

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Antonio Šarić

Zagreb, 2017. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Energetske potrebe električnog autobusa prilagođenog javnom  
gradskom prijevozu grada Zagreba  
(Energy demand of electric bus adapted to public transport in Zagreb)

Mentor: doc. dr. sc. Goran Šagi

Student: Antonio Šarić

Zagreb, 2017. godina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Šarić**

Mat. br.: 0035187915

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Energetske potrebe električnog autobusa prilagođenog javnom gradskom prijevozu grada Zagreba**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Energy demand of electric bus adapted to public transport in Zagreb**

Opis zadatka:

Imajući u vidu potrebe tržišta, obveze smanjenja emisija stakleničkih plinova i energetske učinkovitost koja sve više dobiva na značaju posljednjih godina, u ovom radu potrebno je razmotriti energetske potrebe gradskog autobusa s električnim pogonskim sustavom prilagođenim potrebama javnog gradskog prijevoza u gradu Zagrebu.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Prikazati primjere autobusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu u svijetu, naglasak staviti na uporabne karakteristike (domet, vrijeme punjenja, i sl.)
- Odrediti koji su podaci potrebni za analizu energetske potrebe vozila i osmisliti način njihova snimanja.
- Snimiti nekoliko karakterističnih linija javnog gradskog prijevoza u gradu Zagrebu, odabrati reprezentativne linije koje predstavljaju primjerice: gradsku ravničarsku liniju, gradsku brdsku liniju i izvangradsku liniju.
- Usporediti linije javnog gradskog prijevoza sa standardnim ispitnim ciklusima za autobuse (npr. Braunschweig, TNO, London, ...) na temelju karakterističnih vrijednosti (prosječna brzina, ubrzanja, vrijeme stajanja i sl.).
- Osmisliti ispitni ciklus prilagođen uvjetima javnog gradskog prijevoza u gradu Zagrebu.
- Odrediti energetske potrebe gradskog autobusa za različite scenarije: prazan, polupun, pun autobus; različite linije, različiti setovi baterija (kapacitet i masa baterija).

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, savjesno i prema pravilima za izradu završnog rada, koristeći pri tome znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje te navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Goranu Šagi na nesebičnoj pomoći, stručnoj pomoći pri prikupljanju literature te savjetima, uputama i strpljenju pri izradi rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci i prijateljima koji su me na trnovitom studentskom putu uvijek podržavali i poticali na rad i uspjeh u visokom obrazovanju.

Antonio Šarić

## **Sažetak**

U ovom radu, imajući u vidu nužno smanjenje emisije stakleničkih plinova, energetske učinkovitost razmatrane su energetske potrebe autobusa s električnim pogonskim sustavom u javnom prijevozu grada Zagreba, njegova iskoristivost i dakako, isplativosti. U sklopu rada proučeni su primjeri autobusa s električnim pogonom u svijetu, obavljeno je snimanje nekoliko karakterističnih linija vožnje GPS uređajem *Garmin* (vrijeme trajanja vožnje, udaljenost, broj stajanja/kretanja, brzina, visinska razlika), a nakon toga i analiza snimljenih podataka. Na temelju snimljenih ruta i standardnih ispitnih ciklusa za autobuse (Braunschweig, TNO) osmišljen je Zagrebački ispitni ciklus vožnje.

**Ključne riječi:** električni autobus, baterijski pogonjen autobus, javni gradski prijevoz, Grad Zagreb, ispitni ciklusi.

## **Summary**

In this paper, bearing in mind necessarily reduction of greenhouse gases emissions and energy efficiency, were considered energy needs of bus with electric powertrain in the public transport of Zagreb, its usability and profitability. Examples of buses with electric powertrain in the world are being examined and showed. Characteristic lines were recorded with *Garmin* GPS device and data (speed, driving time, distance, number of stops/starts, altitude difference) is collected and analysed. Based on recorded routes and standard test cycles for buses (Braunschweig, TNO) the Zagreb test cycle is designed.

**Keywords:** electric bus, battery propelled bus, public transport, city of Zagreb, test cycles.

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
1. RAZVOJ AUTOBUSA KROZ POVIJEST .....	1
1.1. Omnibus .....	1
1.2 Trolejbus .....	1
1.3. Motorizirani autobus .....	3
2. AUTOBUSI S ELEKTRIČNIM POGONSKIM SUSTAVOM .....	5
2.1. Hibridi .....	5
2.2. Baterijski pogonjeni autobus.....	6
2.2.1 Baterije .....	7
2.2.2. Sustav regenerativnog kočenja .....	8
2.2.3. Proizvođači .....	8
3. ENERGETSKE POTREBE ZA ELEKTRIČNI AUTOBUS U GRADU ZAGREBU .....	17
3.1. Modeli autobusa korišteni u javnom prijevozu grada Zagreba.....	17
3.2. Analiza energetske potrebe.....	19
3.2.1. Otpori vožnje .....	19
3.2.2. Matematički izrazi za računanje otpora vožnje.....	19
3.2.3. Linije javnog gradskog prijevoza.....	21
3.3. Energetske potrebe autobusa za različite scenarije.....	36
4. USPOREDBA SA STANDARDNIM EUROPSKIM CIKLUSIMA VOŽNJE .....	38
4.1. Standardni ciklusi vožnje .....	38
4.1.1. Braunschweig ciklus .....	39
4.1.2. TNO ciklus .....	39
4.1.3. Karakteristične vrijednosti ispitanih linija .....	40
5. ZAGREBAČKI VOZNI CIKLUS .....	47
6. ZAKLJUČAK.....	49
IZVORI .....	50

## POPIS SLIKA

Slika 1. pariški Omnibus 20 - ih godina 19. stoljeća [1] .....	1
Slika 2. prvi Troljebus; Berlin 1882. godine [2] .....	2
Slika 3. moderni Trolejbus u Slovačkoj [3].....	3
Slika 4. prvi motorizirani autobus (Carl Benz) [4] .....	3
Slika 5. moderni autobus na konvencionalni pogon .....	4
Slika 6. Shema hibridnog paralelnog (lijevo) i serijskog (desno) pogonskog sustava [6] .....	5
Slika 7. shema pogonskog sustava baterijski pogonjenog autobusa [6] .....	6
Slika 8. tehnologija baterija kroz vrijeme [7].....	7
Slika 9. shema rada sustava regenerativnog kočenja [9] .....	8
Slika 10. Proterra Catalyst 40 E2 [10] .....	9
Slika 11. baterijski set Proterra [10] .....	9
Slika 12. prikaz uštede autobusa Proterra Catalyst 40 E2 na 12-godišnjoj razini [10] .....	10
Slika 13. BYD K9 eBus na ulicama Amsterdama [8] .....	11
Slika 14. ElectriCity Bus autoprijevoznika Wiener Linien [11] .....	12
Slika 15. Solaris Urbino 8.9 Electric [12] .....	12
Slika 16. Solaris Urbino 12 Electric [12] .....	12
Slika 17. VDL Citea SLFA Electric u Kölnu [13] .....	13
Slika 18. Škoda Perun HP [14].....	14
Slika 19. Bluekens Volvo 7700 Electric [14].....	15
Slika 20. Mercedes - Benz Citaro O530LE (lijevo) i O530G (desno).....	17
Slika 21. dijagramski prikaz, 109 smjer Dugave.....	22
Slika 22. dijagramski prikaz, 109 smjer Črnomerec.....	23
Slika 23. dijagramski prikaz, 218 smjer Savica.....	24
Slika 24. dijagramski prikaz, 218 smjer Gl. kolodvor .....	25
Slika 25. dijagramski prikaz, 115 smjer Špansko .....	26
Slika 26. dijagramski prikaz, 115 smjer Ljubljana .....	27
Slika 27. dijagramski prikaz, 102 smjer Britanski trg .....	28
Slika 28. dijagramski prikaz, 102 smjer Mihaljevac .....	29
Slika 29. dijagramski prikaz, 127 smjer Mikulići .....	30
Slika 30. dijagramski prikaz, 127 smjer Črnomerec.....	31
Slika 31. dijagramski prikaz, 268 smjer Velika Gorica .....	32
Slika 32. dijagramski prikaz, 268 smjer Gl. kolodvor .....	33
Slika 33. dijagramski prikaz, 112 smjer Lučko .....	34
Slika 34. dijagramski prikaz, 112 smjer Savski most.....	35
Slika 35. shema šasijskog dinamometra [17] .....	38
Slika 36. karakteristične vrijednosti Braunschweig ciklusa [18] .....	39
Slika 37. karakteristične vrijednosti TNO ciklusa [18] .....	40
Slika 38. dijagram brzine linije 109, smjer Dugave.....	45
Slika 39. dijagram brzine Braunschweig ciklusa [18].....	45
Slika 40. dijagram brzine, linija 115 smjer Ljubljana.....	45
Slika 41. dijagram brzine TNO ciklusa [18] .....	46



## POPIS TABLICA

Tablica 1. tehničke karakteristike Catalyst 40 E2.....	9
Tablica 2. tehničke karakteristike BYD K9.....	11
Tablica 3. tehničke karakteristike ElectriCity autobusa.....	12
Tablica 4. tehničke karakteristike Urbino 8.9.....	13
Tablica 4. tehničke karakteristike Urbino 12.....	13
Tablica 5. tehničke karakteristike VDL Citea SLFA.....	14
Tablica 6. tehničke karakteristike Škoda Perun HP.....	14
Tablica 7. tehničke karakteristike Volvo 7700.....	15
Tablica 8. zajednički prikaz autobusa.....	16
Tablica 9. tehničke karakteristike Mercedes – Benz citaro O530LE.....	18
Tablica 10. tehničke karakteristike Mercedes - Benz Citaro O530G.....	18
Tablica 11. popis ispitanih linija.....	21
Tablica 12: podaci s ispitivanja, 109 smjer Dugave.....	22
Tablica 13: podaci s ispitivanja, 109 smjer Črnomerec.....	23
Tablica 14: podaci s ispitivanja, 218 smjer Savica.....	24
Tablica 15: podaci s ispitivanja, 218 smjer Gl. Kolodvor.....	25
Tablica 16: podaci s ispitivanja, 115 smjer Špansko.....	26
Tablica 17: podaci s ispitivanja, 115 smjer Ljubljana.....	27
Tablica 18: podaci s ispitivanja, 102 smjer Britanski trg.....	28
Tablica 19: podaci s ispitivanja, 102 smjer Mihaljevac.....	29
Tablica 20: podaci s ispitivanja, 127 smjer Mikulići.....	30
Tablica 21: podaci s ispitivanja, 127 smjer Črnomerec.....	31
Tablica 22: podaci s ispitivanja, 268 smjer Velika Gorica.....	32
Tablica 23: podaci s ispitivanja, 268 smjer Velika Gorica.....	33
Tablica 24: podaci s ispitivanja, 112 smjer Lučko.....	34
Tablica 25: podaci s ispitivanja, 112 smjer Savski most.....	35
Tablica 26. energetske potrebe za različit broj putnika.....	36
Tablica 27. karakteristične vrijednosti gradskih brdskih linija.....	42
Tablica 28. karakteristične vrijednosti gradskih ravničarskih linija.....	43
Tablica 29. karakteristične vrijednosti izvangradskih ravničarskih linija.....	44
Tablica 30. karakteristične vrijednosti zagrebačkog ispitnog ciklusa.....	47

## POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Mjerna jedinica</u>	<u>Opis</u>
$T_{ukupno}$	s	vrijeme ciklusa
$T_{stajanja}$	s	vrijeme stajanja
$T_{vožnje}$	s	vrijeme vožnje
$H$	m	nadmorska visina
$s$	m	put vožnje
$\alpha$	rad	kut nagiba
$v$	km/h; m/s	brzina vožnje
$v_{srednja}$	km/h	prosječna brzina
$v_{sd}$	km/h	standardna devijacija brzine
$a$	m/s <sup>2</sup>	akceleracija
$a_{sr}$	m/s <sup>2</sup>	prosječna akceleracija
$a_{sr\_poz}$	m/s <sup>2</sup>	prosječna pozitivna akceleracija
$a_{sd}$	m/s <sup>2</sup>	standardna devijacija akceleracije
$M$	Nm	okretni moment
$F_i$	N	sile otpora vožnje
$P_i$	kW	snage otpora vožnje
$F_{ukupno}$	N	ukupna sila otpora vožnje
$P_{ukupno}$	kW	ukupna snaga otpora vožnje
$E_{reg}$	kJ	energija regenerativnog kočenja
$E_{ukupno}$	kJ	ukupna potrošnja energije
$A$	m <sup>2</sup>	čelona površina
$f_{kot}$	-	faktor otpora kotrljanja
$c_w$	-	faktor otpora zraka
$f_{btw}$	-	faktor korisnosti pogona
$f_{reg}$	-	faktor regenerativnog kočenja



## 1. RAZVOJ AUTOBUSA KROZ POVIJEST

### 1.1. Omnibus

Omnibus je naziv prvog organiziranog sustava javnog prijevoza. Prema jednoj verziji, nastao je u Nantesu u Francuskoj 1826. Stanislas Baudry, vlasnik javnog kupališta na kraju grada, uveo je kratku kolsku liniju, kočiju koja je vozila od centra grada do kupališta. Polazište je bilo pred šesirnicom izvjesnog Omnèsa, čiji je reklamni slogan bila igra riječi Omnès omnibus. Baudry je ubrzo ustanovio da putnici liniju koriste i za prijevoz do usputnih stajališta, te je promijenio svoju poslovnu orijentaciju: Voiture omnibus ("kočija za sve", neovisno o njihovu društvenom statusu) bila je kombinacija fijakera za najam i poštanske kočije; imala je drvene klupe duž bokova kola, a ulazilo se straga; pariški su omnibusi imali i otvorene gornje razine, sjedeća mjesta na krovu kočije.



Slika 1. pariški Omnibus 20 - ih godina 19. stoljeća [1]

### 1.2 Trolejbus

Trolejbus (eng. *trolley-bus*) je električno vozilo za gradski prijevoz putnika. Glavni pogon ostvaruje preko elektromotora koji mogu biti istosmjerni serijski ili trofazni asinkroni motori. 29. travnja 1882. godine Siemens, Werner i William ispitali su vozilo naziva '*Elektromote*' [3] na testnoj stazi dugoj 540 m. Vozilo je na strujne vodove (dva bakrena vodiča) bilo spojeno posebnim 'oduzimačem struje' te tako dovodilo struju do dva elektromotora smještena ispod

vozačeva sjedala. Dva elektromotora ukupne snage 5,2 kW, pod naponom 550V istosmjerne struje omogućavala su maksimalnu brzinu od 12 km/h. Projekt se, u godinama koje su slijedile nakon, nije nastavio razvijati iz razloga što su ceste bile neprikladne, a tada još gumenih pneumatika nije bilo. Na samom početku 20. stoljeća inženjer Max Schiemann u partnerstvu sa Siemensom oživio je projekt 'Elektromote', napravio poboljšanja u pogonu i skladištenju električne struje, povećao udobnost i kao rezultat 1920-ih godina na međunarodnu scenu dolazi 'Obus', nama poznatiji kao *Trolejbus*, koji je i danas prisutan.



Slika 2. prvi Troljebus; Berlin 1882. godine [2]

Moderni su Trolejbusi gotovo identični autobusima. Iako se kreću izvan tračnica, u neprekidnom su kontaktu sa strujnom mrežom preko dvije *trole* (oduzimači struje) duljine od 66 m što im omogućava manevriranja u prometu (promjena trake, zaobilaženje itd.).



Slika 3. moderni Trolejbus u Slovačkoj [3]

### 1.3. Motorizirani autobus

Krajem 19. stoljeća, *Carl Benz* napravio je prvi automobil koji je za pogon koristio motor s unutarnjim izgaranjem. Pošto je prodaja ovog izuma u početku bila relativno loša, *Benz* je razmišljao kako novu tehnologiju primijeniti u druge svrhe. S ciljem približavanja motoriziranog vozila širem puku *Carl Benz* izumio je motorizirani autobus. Prvi u svijetu motorizirani autobus ušao je u službu kompanije *Netphener Omnibus-Gesellschaft GmbH* 18. ožujka 1895. godine. u Njemačkoj. Iz horizontalno postavljenog, jednocilindarskog motora smještenog straga razvijao je snagu od 3,7 kW i mogao je smjestiti 8 ljudi.



Slika 4. prvi motorizirani autobus (Carl Benz) [4]

Bili su to počeci javnog prijevoza autobusom pogonjenim motorom s unutarnjim izgaranjem, koji je do današnjih dana zauzeo najveći udio u području prijevoza putnika. Na taj način

naročito se može govoriti kada su u pitanju gradovi koji nemaju razvijen sustav javnog prijevoza u obliku tramvajskih mreža, podzemnih željeznica i sl. Moderne tehnologije, napredak u znanosti i opširna istraživanja dovele su do toga da današnji autobusi zadovoljavaju vrlo visoke norme.



Slika 5. moderni autobus na konvencionalni pogon

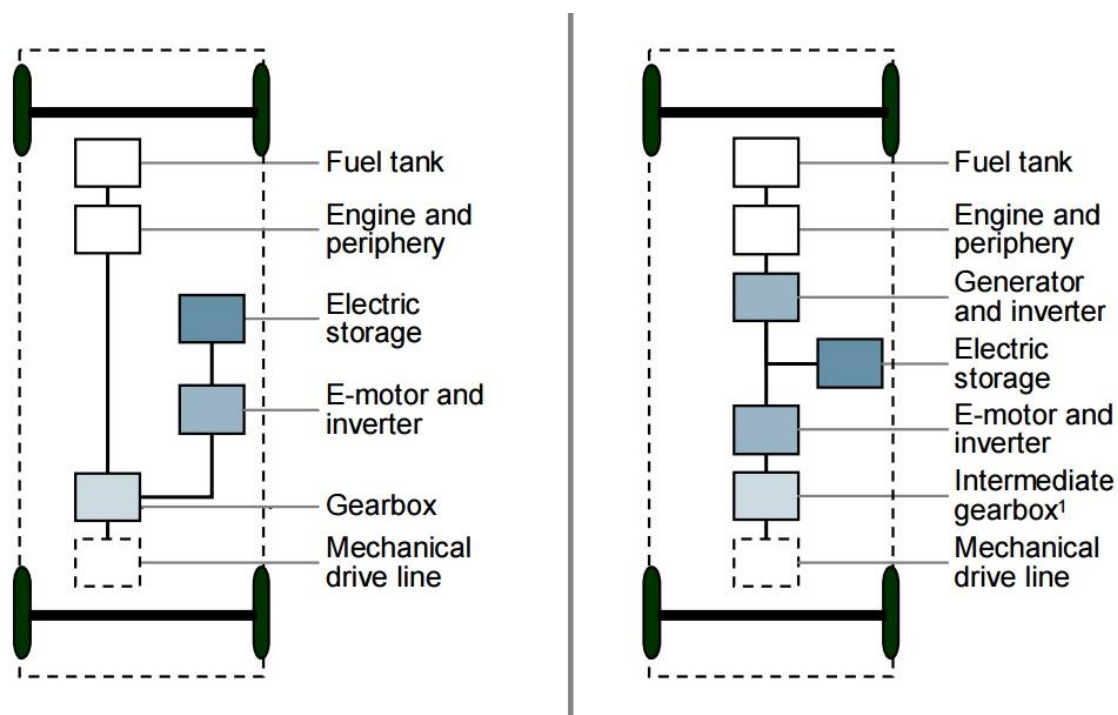
Posljednjih godina prisutan je trend povećanja energetske učinkovitosti. U Europi je na snazi EURO VI razina emisije ispušnih plinova za sva nova cestovna vozila proizvedena nakon 1. rujna 2015. godine. Potrošnja goriva, emisija štetnih plinova, ispuštanje krutih čestica svedeni su na vrlo nisku razinu u odnosu na stare autobuse. Zalihe fosilnih goriva postoje još u velikim količinama, bez obzira na eksponencijalni porast potrošnje u zadnjih 50 godina. Grube procjene govore da će se na derivate nafte voziti bar do 2050. godine. No, naglasak se mora staviti na planet Zemlju kojemu ozbiljno prijete velike klimatske promjene, a jedan od glavnih uzroka su cestovna i sva druga vozila te strojevi koji za svoj rad i pogon koriste motor s unutarnjim izgaranjem.



## 2. AUTOBUSI S ELEKTRIČNIM POGONSKIM SUSTAVOM

### 2.1. Hibridi

Hibridni električni autobus je autobus koji koristi hibridnu električnu tehnologiju za pokretanje, umjesto uobičajenog Diesellovog motora. Ovo vozilo kombinira uobičajeni sustav pokretanja sa spremnikom električne energije (punjiva baterija) kako bi se postigla bolja učinkovitost korištenja goriva nego kod konvencionalnih vozila. Kombinacija motora s unutarnjim izgaranjem uz električni motor, znači kako nisu potrebni posjeti stanici za punjenje. Hibridni autobus u gradskoj vožnji troši do 30 % manje goriva, 26 % manje zagađuje okoliš i tiše radi [5] u odnosu na uobičajena vozila s isključivo dizelskim pogonskim sustavom. Uglavnom su opremljeni tehnologijom regenerativnog kočenja, što znači kako se kinetička energija autobusa prilikom kočenja pretvara u električnu energiju.



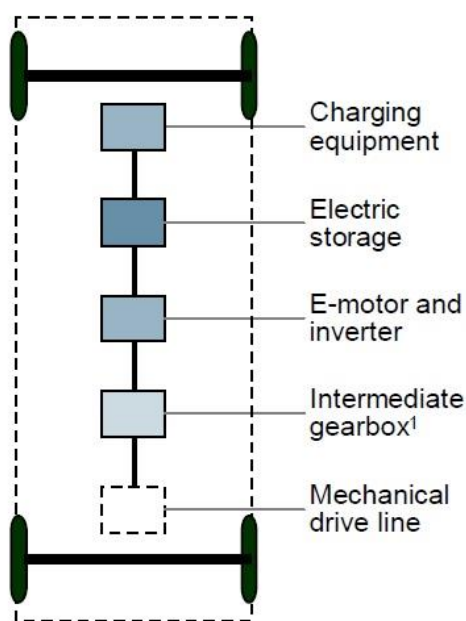
Slika 6. Shema hibridnog paralelnog (lijevo) i serijskog (desno) pogonskog sustava [6]

Autobusi s ovom vrstom pogonskog sustava zastupljeni su u svijetu u mnogim gradovima (Amsterdam, Beč, Frankfurt, Berlin, New-York itd.) Iako im je početna cijena osjetno veća od konvencionalnih autobusa, prednosti koje donose su višestruke, što je iznad navedeno.



## 2.2. Baterijski pogonjeni autobus

U globalnom nastojanju smanjivanja emisije stakleničkih plinova, zaštite okoliša i korištenju obnovljivih izvora energije, nove tehnologije u cestovnom prometu dobivaju veliki značaj. Veliki korak u istraživanju i unaprjeđenju predstavljaju vozila s potpunim električnim pogonskim sustavom koji kao 'gorivo' koristi kemijsku energiju pohranjenu u punjivim baterijama. Autobusi pogonjeni isključivo električnom energijom iz baterija, iako dostupni na tržištu, još su velikim dijelom u fazi prototipnog razvoja (Mercedes-Benz, MAN). Najveći izazov predstavljaju, upravo, setovi baterija koji u sadašnjoj fazi razvoja uglavnom nisu u mogućnosti pohraniti dovoljno električne energije kako bi pogonili autobus tokom čitavog radnog dana, a pri tome bili kompaktni i cjenovno pristupačni. Ipak, u svijetu postoji nekoliko proizvođača koji su svoje područje djelatnosti usmjerili na istraživanje i razvoj ovog pogonskog sustava i setova baterija.



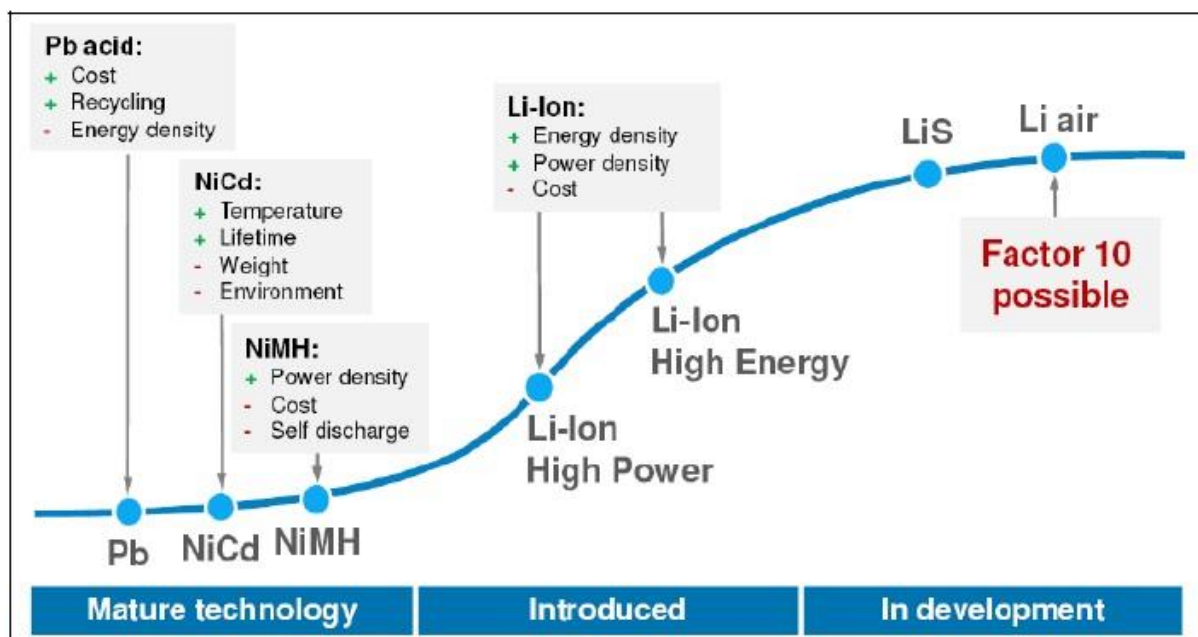
Slika 7. shema pogonskog sustava baterijski pogonjenog autobusa [6]

Razlikuju se dvije vrste baterijski pogonjenih autobusa. Oni koji se pune noću dok autobus stoji u garaži (*Overnight-charging powertrain*) te oni koji se mogu puniti tijekom radnog ciklusa (*Opportunity-charging powertrain*), na terminalima i usputnim stanicama. Potonji su zbog manjeg kapaciteta baterija cjenovno prihvatljiviji, no nužna je izgradnje infrastrukture punionica u gradovima u kojima bi se koristio. Iz tog su razloga u prednosti gradovi koji

posjeduju sustav javnog prijevoza u obliku trolejbusa ili tramvaja jer se postojeća infrastruktura može, uz određene dorade, iskoristiti za punionice električnih autobusa.

### 2.2.1 Baterije

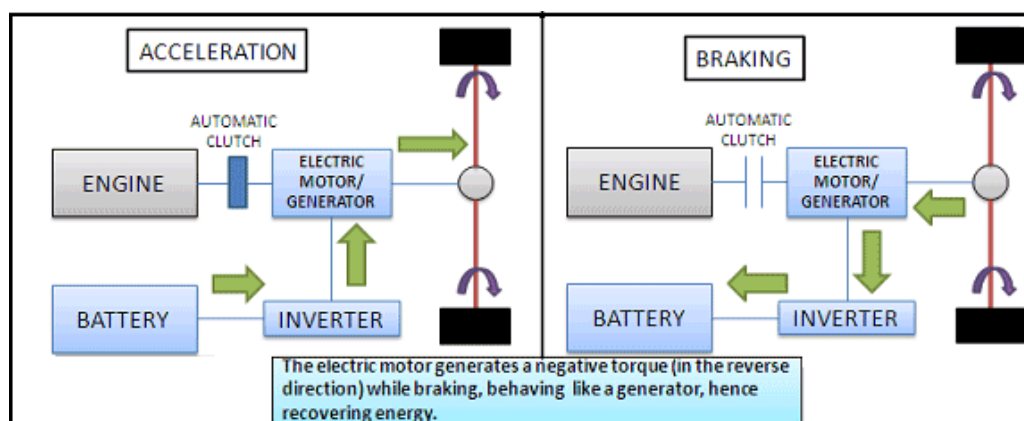
Baterije, kao i u svim električnim uređajima koji ih sadrže, tako se i u električnim vozilima koriste za pohranu električne energije koja je gorivo za pogon električnih vozila. U posljednjih nekoliko godina, razvoj baterija za pogon električnih vozila daje odlične rezultate. Bitne karakteristike: omjeri snaga/masa, energija/masa i gustoća energije eksponencijalno su unaprijeđeni. Najčešće korištena je Litij – ionska baterija. Maksimalan broj ciklusa punjenja i pražnjenja danas je preko 4000 (1997. >1000), a cijena 'energije' je 130 €/kWh što u odnosu na iznos 600 €/kWh iz 2010. [7] godine predstavlja višestruko smanjenje. Vijek trajanja, uz pravilnu upotrebu, je više od 10 godina. Cijena seta baterija ima vrlo visok udio u početnoj cijeni električnog vozila, no gledajući na razini energije cijena baterije je samo mali dio cijene fosilnog goriva potrošenog za dobivanje jednakog iznosa energije.



Slika 8. tehnologija baterija kroz vrijeme [7]

### 2.2.2. Sustav regenerativnog kočenja

Takvo kočenje koristi se kod električnih ili hibridnih vozila. Zanimljivo svojstvo vozila s elektromotorom je to što ako se motor vrti u jednom smjeru (moment i brzina vrtnje su u istom smjeru) pretvara električnu energiju iz izvora, najčešće baterije, u kinetičku energiju, a kad se vrti u suprotnom smjeru (moment i brzina vrtnje u suprotnom smjeru), kod kočenja, ponaša se kao generator i šalje električnu energiju u izvor, tj. puni bateriju ili šalje struju u mrežu. Na taj način vozilu se smanjuje brzina bez trošenja kinetičke energije na toplinu. Električna ili hibridna vozila s takvim sustavom za kočenje koriste, uz to, i standardne kočnice koje rade na principu trenja pa motor mora prepoznati koji je sustav kočenja bolji u određenim uvjetima. To je najčešće kontrolirano elektroničkim putem. Električnim generatorskim kočenjem može se „spasiti“ 50 % energije koja se standardnim kočnicama gubi u toplinu. Takvim sustavima može se smanjiti potrošnja goriva od 10-25 %.



Slika 9. shema rada sustava regenerativnog kočenja [9]

### 2.2.3. Proizvođači

#### 2.2.3.1. Proterra

(Proterra = za Zemlju), startup osnovan u Californiji, SAD, među liderima u proizvodnji električnih autobusa. Pogonski sustavi, setovi baterija, sustavi punjenja koje ova tvrtka razvija jedni su od najnaprednijih u svijetu. Tvrtku Proterra podupiru i s njom surađuju brojne multinacionalne kompanije poput Applea, General Motorsa i Tesla Motorsa. Njihova velika odlika je najava da će sve svoje zaštićene patente učiniti dostupnima svijetu i tako omogućiti strelovit nastavak razvijanja tehnologija koje se ispostavljaju kao ključne za planet Zemlju i okoliš kojim smo okruženi

**Proterra Catalyst 30 i 40** je serija autobusa ukupnih duljina 11,25 m i 13,95m i predstavljaju zadnja postignuća tvrtke Proterra u području električnih autobusa. Najsofisticiraniji model,

tzv. 'flagship' je **Proterra Catalyst 40 E2**. Još uvijek u fazi testiranja i s planom izlaska na tržište u 2017. godini. Važno je napomenuti da je ovaj autobus pod testnim uvjetima u kolovozu 2016. godine na Michelinovoj testnoj stazi postigao autonomiju od 965 km [16].



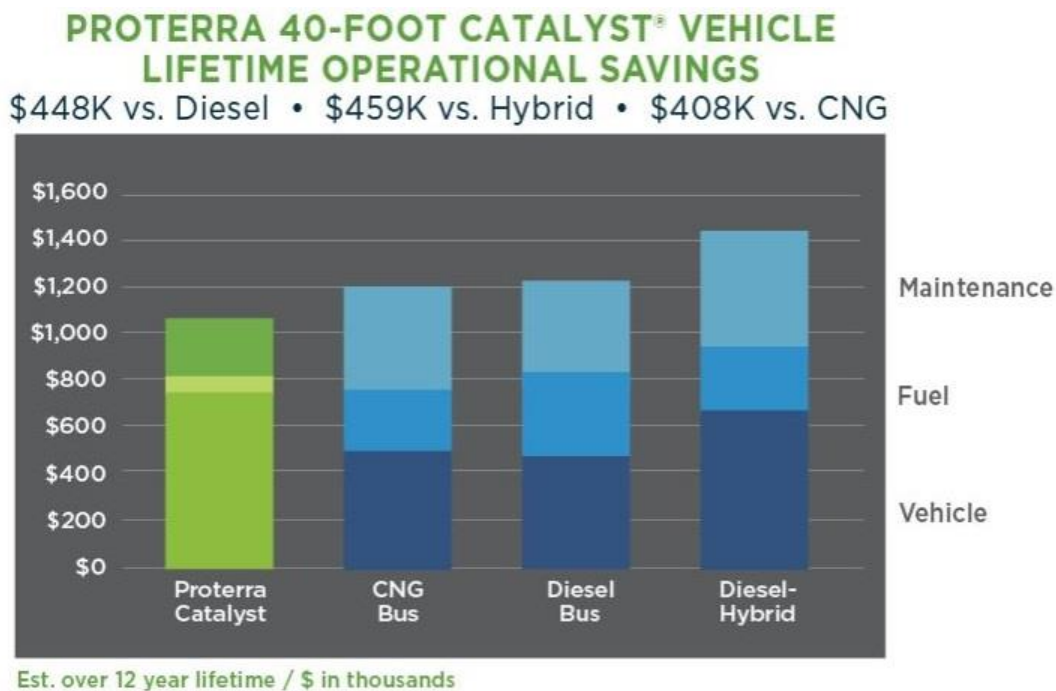
Slika 10. Proterra Catalyst 40 E2 [10]

Duljina	13,95 m
Masa	15000 kg
Kapacitet putnika	40 sjedećih mjesta
Kapacitet baterije	Litij Titan Oksid 660 kWh
Pogonski sustav	Trofazni asinkroni motor 250kW
Okretni moment	
Autonomija	560 km



Slika 11. baterijski set Proterra [10]

tablica 1. tehničke karakteristike Catalyst 40 E2



Slika 12. prikaz uštede autobusa Proterra Catalyst 40 E2 na 12-godišnjoj razini [10]

#### 2.2.3.2 BYD

**BYD ( Build Your Dream)** kineski je proizvođač automobila i autobusa sa sjedištem u Xi'an – u, provincija Shaanxi u Kini osnovan 2003. godine. 2015. godine postaje vodeći svjetski proizvođač električnih vozila, ispred General Motorsa i Nissana.

**BYD K9 eBus** – električni je niskopodni autobus kompanije BYD smještajnog kapaciteta od 30+1 sjedećih mjesta koji je izašao na tržište 2010. godine. Puni se sustavom snage 60 kW ukupnog napona 380 V izmjenične struje, a vrijeme punjenja do maksimalnog kapaciteta je 5h. Brzim punjenjem moguće je napuniti puni kapacitet baterija u periodu manjem od 3h. Kako je napomenuto, BYD je vodeći svjetski proizvođač električnih vozila pa tako i autobusa kojih je do danas isporučeno u količini od čak 6000 komada širom svijeta. Razlog tome je vrlo povoljna cijena od 380.000 €, nekoliko desetaka tisuća eura više nego konvencionalni autobus. BYD navodi kako ovaj autobus za 8 godina korištenja ostvaruje uštedu od 150.000 € što ga, kao visoko učinkovitog, čini vrlo konkurentnim i prognozira mu svijetlu budućnost u godinama koje dolaze.





Slika 13. BYD K9 eBus na ulicama Amsterdama [8]

Duljina	12 m
Masa	18000 kg
Kapacitet putnika	30 sjedećih mjesta
Kapacitet baterije	LiFePo4 - 324 kWh
Okretni moment	700 Nm
Pogonski sustav	In Wheel hub 180 kW
Autonomija	250 km

tablica 2. tehničke karakteristike BYD K9

#### 2.2.3.3. Siemens&Rampini

Prvi serijski ovakav proizvod u Europi koji je rezultat suradnje njemačkog giganta Siemens i talijanskog proizvođača Rampini je autobus službenog naziva „ElectriCityBus“ kojega je Bečki autoprijevoznik Wiener Linien (WL) naručio u količini od 12 komada za uži centar grada. Karakterističan je i po tome što energiju prikuplja od kočenja i skladišti je (regenerativno kočenje), dok se brzim punjenjem na stanicama (pantografom) baterije napune za 15 minuta. Električna energija također služi za grijanje i hlađenje. Kompaktne dimenzije mu omogućuju izvrsne manevarske sposobnosti u centru glavnog grada Austrije.



Slika 14. ElectriCity Bus autoprijevoznika Wiener Linien [11]

Duljina	7, 72m
Masa	12000 kg
Kapacitet putnika	40+1
Kapacitet baterije	96 kWh
Okretni moment	500 Nm
Pogonski sustav	Trofazni asinkroni motor 150kW
Autonomija	150 km

tablica 3. tehničke karakteristike ElectriCity autobusa

#### 2.2.3.4. Solaris

**Urbino 8.9 LE Electric, Urbino 12 Electric te Urbino 18 Electric** niskopodni su, potpuno električni autobusi poljskog proizvođača Solaris Bus & Coach. Najmanji model predstavljen je 2011. godine, a u serijsku proizvodnju ušao je 2013. godine. Brojčana oznaka u nazivu modela označava duljinu autobusa. Prvi primjerci isporučeni su u Braunschweig u sklopu projekta EMIL. Sva tri autobusa posjeduju sustav regenerativnog kočenja



Slika 15. Solaris Urbino 8.9 Electric [12]



Slika 16. Solaris Urbino 12 Electric [12]

Duljina	8,8 m
Masa	13000 kg
Kapacitet putnika	29 sjedećih mjesta
Kapacitet baterije	120.9 kWh
Okretni moment	1400
Pogonski sustav	In Wheel 120kW
Autonomija	120 km

tablica 4. teh. karakteristike Urbino 8.9

Duljina	12 m
Masa	15000 kg
Kapacitet putnika	34 sjedećih mjesta
Kapacitet baterije	210 kWh
Okretni moment	
Pogonski sustav	In Wheel 160kW
Autonomija	150 km

tablica 5. tehničke karakteristike Urbino 12

### 2.2.3.5 VDL

**VDL** Nizozemski je proizvođač autobusa osnovan 1993. godine. U njihovoj ponudi, osim autobusa s Dieslovim motorom i hibridnih autobusa, nalazi se asortiman autobusa na potpuno električni pogon, kratkog (*Opportunity-charging*) i dugog (*Overnight-charging*) dometa. Do početka 2017. godine isporučili su preko 30 ovakvih autobusa, najviše nizozemskim gradovima.

**VDL Citea SLFA Electric** je zglobni baterijski pogonjen električni autobus isporučen 2015. godine u Njemački grad Köln, vozi na liniji 133. Karakterizira ga futuristički izgled te sustav punjenja pomoću pantografa (*Opportunity-charging*), što je na slici ispod vidljivo. Također, posjeduje sustav regenerativnog kočenja.



Slika 17. VDL Citea SLFA Electric u Kölnu [13]



Duljina	18,1 m
Masa	19000 kg
Kapacitet putnika	140
Kapacitet baterije	122 kWh Li-ion Nano
Okretni moment	2000 Nm
Pogonski sustav	240 kW Siemens
Autonomija	

tablica 5. tehničke karakteristike VDL Citea SLFA

## 2.2.3.6. Škoda

**Škoda Perun HP** električni autobus češke tvornice vozila u suradnji s poljskim Solarisom. Prva dva primjerka u sklopu europskog projekta ZEEUS (*Zero Emission Urban bus Systems*) isporučena su u grad Plzen u Češkoj. Autobus se puni na terminalima preko pantografa (*Opportunity – charging*). Škoda Ultra Fast Charger (UFC) sustav omogućuje punjenje do maksimalnog kapaciteta baterija u 5 – 8 minuta. Opremljen je sustavom regenerativnog kočenja.



Slika 18. Škoda Perun HP [14]

Duljina	12 m
Masa	
Kapacitet putnika	85 (27 sjedećih)
Kapacitet baterije	78 kWh Li-ion
Okretni moment	
Pogonski sustav	160 kW
Autonomija	30 km

tablica 6. tehničke karakteristike Škoda Perun HP

## 2.2.3.7. Volvo

**Bluekens Volvo 7700 Electric** je u stvari prenamijenjeni standardni autobus Volvo 7700 s Diesellovim motorom. Prenamjenu je napravila nizozemska tvrtka Bluekens, ovlašteni trgovac Volvovim voznim programom. Autobus prometuje u nizozemskom gradu Den Bosch i dnevno vozi oko 289 km po ravnoj trasi u centru grada. Opremljen je sustavom brzog punjenja (*Opportunity – charging*) preko indukcijskog pantografa na točkama tijekom rute i sustavom regenerativnog kočenja.



Slika 19. Bluekens Volvo 7700 Electric [14]

Duljina	12 m
Masa	12000 kg
Kapacitet putnika	86
Kapacitet baterije	120 kWh LiFePo4
Okretni moment	
Pogonski sustav	
Autonomija	

tablica 7. teh. karakteristike Volvo 7700

Autobus	duljina	bruto masa	kapacitet putnika	kapacitet baterije	pogonski sustav	okretni moment	autonomija	opportunitiy charging
Proterra Catalyst 40 E2	13,95 m	19000	40 sjedećih mjesta	660 kWh	3F asinkr. 250 kW	-	560 km	-
BYD K9 ebus	12 m	19000	25 sjedećih mjesta	324 kWh	IWH 180 kWh	700 Nm	250 km	-
S&R ElectriCity	7,72 m	12000	40	96 kWh	3F asinkr. 150 kW	500 Nm	150 km	+
Solaris Urbino 8.9 LE Electric	8,8 m	13000	29 sjedećih mjesta	120,9 kWh	IWH 120 kW	1400 Nm	120 km	-
Solaris Urbino 12 Electric	12 m	15000	34 sjedećih mjesta	210 kWh	IWH 160 kW	-	150 km	-
VDL Citea SLFA Electric	18,1 m	19000	140	122 kWh	240 kW	2000 Nm	-	+
Škoda Perun HP	12 m	-	85	78 kWh	160 kW		30 km	+
Volvo 7700 Electric	12 m	12000	86	120 kWh	-	-	-	+

tablica 8. zajednički prikaz autobusa

U tržišnu utrku razvoja i proizvodnje električnih autobusa mahom se uključuje sve veći broj vodećih proizvođača od kojih su za Europu zasigurno najpoznatiji *MAN* i *Mercedes – Benz*. *Mercedesov* najpoznatiji gradski autobus *Citaro* pogonjen električnom energijom u fazi je prototipnog razvoja, a plan je 2018. godine početi s isporukom baterijski pogonjenog električnog autobusa imena *Citaro E-CELL*. Gustav Tuschen, voditelj razvoja u sekciji autobusa Daimler grupe napominje kako će do 2030. godine čak 75 % novo registriranih autobusa biti pogonjeno električnom energijom.

### 3. ENERGETSKE POTREBE ZA ELEKTRIČNI AUTOBUS U GRADU ZAGREBU

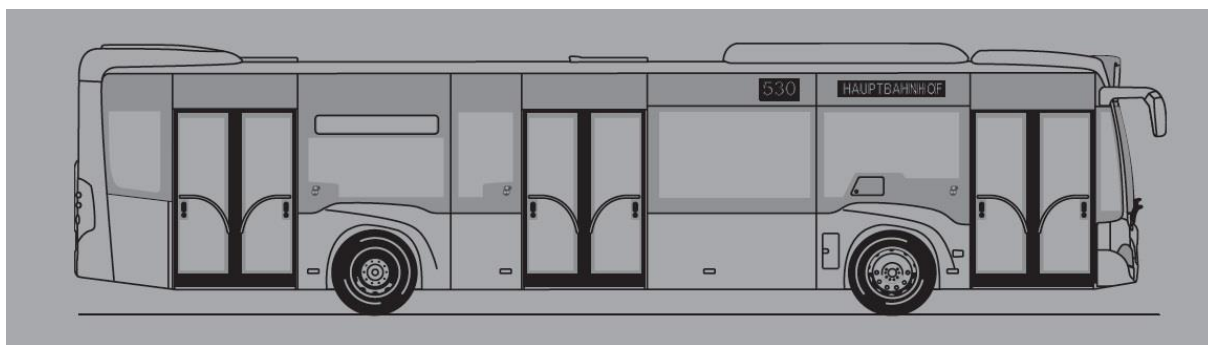
#### 3.1. Modeli autobusa korišteni u javnom prijevozu grada Zagreba

U Gradu Zagrebu i dijelu Zagrebačke županije javni prijevoz tramvajskom i autobusnom mrežom organizira podružnica Zagrebačkog Holdinga d.o.o., tvrtka ZET (Zagrebački električni tramvaj). Tramvajima se na 15 dnevnih i 4 cjelonoćne linije godišnje preveze više od 200 milijuna putnika, dok se autobusima na 135 dnevnih i 4 cjelonoćne linije preveze oko 94 milijuna Zagrepčana i gostiju grada. 2008. i 2009. godine moderniziran je autobusni vozni park, nabavljeno je 60 niskopodnih autobusa marke *Irizar* s pogonom na ukapljeni naftni plin te 199 niskopodnih autobusa s Dieselovim motorom marki *MAN Lion's City* te *Mercedes – Benz Citaro*. Cilj je ZET –a , u skoroj budućnosti, orijentacija cjelokupnog autobusnog prometa na ekološki prihvatljiva pogonska goriva. U sklopu ovog rada razmatraju se energetske potrebe na određenim linijama gradskog prijevoza, a u svrhu prenamjene autobusa na konvencionalni pogon u autobus s elektromotorom pogonjen električnom energijom iz baterija. Kao reprezentativni uzorak uzet će se autobusi marke *Mercedes – Benz*, model *Citaro O530 LE*, standardne duljine s dvije osovine te model *O530G*, zglobni autobus s tri osovine. Autobusi marke *MAN* koji se koriste u javnom prijevozu gotovo su jednakih tehničkih karakteristika. Prenamjena autobusa bi se izvršila na način da se na mjesto motora s unutarnjim izgaranjem postavi odgovarajući elektromotor, sustav prijenosa potrebno je prilagoditi novom pogonskom sustavu i spremnik goriva također izbaciti kako bi se dobio prostor u koji bi se smjestili setovi baterija



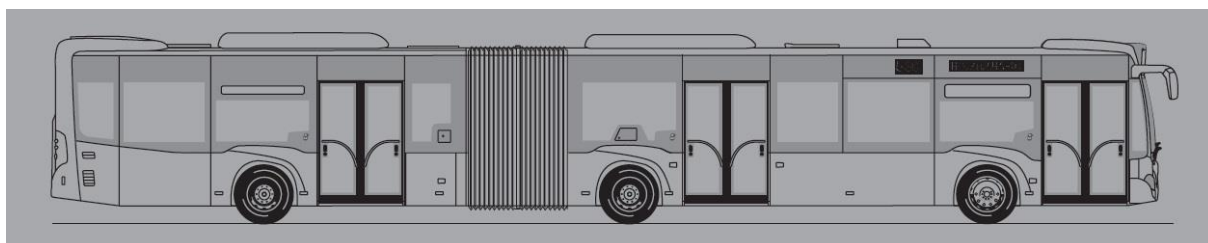
Slika 20. Mercedes - Benz Citaro O530LE (lijevo) i O530G (desno)

## Tehničke specifikacije



tablica 9. teh karakteristike Mercedes – Benz citaro O530LE

Mercedes – Benz Citaro O530LE [15] standardni	
Tehnički podaci	
Dimenzije (DxŠxV)	12040 x 2550 x 3076 mm
Masa praznog vozila	11125 kg
Najveća dopuštena masa	18000 kg
Kapacitet putnika	101
Čeona površina	6,75 m <sup>2</sup>
Faktor otpora zraka $c_w$	0,36
Faktor otpora kotrljanja $f_{kot}$	0,013



tablica 10. tehničke karakteristike Mercedes - Benz Citaro O530G

Mercedes – Benz Citaro O530G [15] zglobni	
Tehnički podaci	
Dimenzije (DxŠxV)	17940 x 2550 x 3076 mm
Masa praznog vozila	17100 kg
Najveća dopuštena masa	29000 kg
Kapacitet putnika	158
Čeona površina	6,75 m <sup>2</sup>
Faktor otpora zraka $c_w$	0,36
Faktor otpora kotrljanja $f_{kot}$	0,013

### 3.2. Analiza energetske potrebe

U svrhu ispitivanja energetske potrebe električnog autobusa na području Grada Zagreba odabrane su karakteristične linije prijevoza koje predstavljaju vožnju na ravnoj trasi užeg središta grada, brdsku liniju te izvangradsku liniju koja seže na područje Zagrebačke županije. Snimanje linija provedeno je u realnim uvjetima u prometu u različitim periodima radnog dana od početne do krajnje točke navigacijskim uređajem *Garmin Edge 800* koji tokom ciklusa bilježi brzinu vožnje, vrijeme vožnje i nadmorsku visinu. Iz snimljenih podataka u programskom alatu Microsoft Excell, a uz dolje navedene matematičke izraze došlo se do podataka nužnih za analizu i utvrđivanje energetske potrebe za prenamjenu konvencionalnog u autobus pogonjen elektromotorom. Dobiveni rezultati za karakteristične gradske linije prikazani su tablično te u dijagramskom obliku s opisom podataka (brzina/ubrzanje/nadmorska visina u vremenu vožnje). Bitno je napomenuti da je uređaj *Garmin Edge 800* amaterski uređaj koji se prvenstveno koristi u sportskoj aktivnosti poput biciklizma za bilježenje podataka o ruti kojom se vozi. Ipak, uređaj omogućuje spremanje podataka s rezolucijom od 1 sekunde što odgovara i rezoluciji prikupljanja podataka kod mjerenja emisije štetnih plinova u strogim uvjetima vožnje PEMS uređajem u WLTP ciklusu koji će u narednim godinama biti vrlo aktualan. Zbog nedostatka profesionalne i precizne opreme moguća su odstupanja od pravih vrijednosti, no zbog same prirode ovog rada ona nisu naročito značajna. Mnogo detaljnija i opsežnija istraživanja s atestiranom opremom provode tvrtke proizvođači koji tehnologiju i proizvode razvijaju i plasiraju na tržište, a sve u svrhu optimiranja troškova proizvodnje i prilagođavanja autobusa individualnim područjima na kojima se javni prijevoz odvija.

#### 3.2.1. Otpori vožnje

Kretanju vozila odupiru se određeni otpori, koje pogon vozila mora savladati. Istovremeno, performanse vozila ograničene su karakteristikama prijanjanja kotača i podloge. Pogonske sile moraju biti jednake (ili veće) svim otporima vožnje koji djeluju na vozilo. S druge strane, pogonske sile moraju biti manje od (ili jednake) najvećih sila prijanjanja. Na performanse ne utječe samo najveća snaga motora već i ponašanje u uvjetima djelomičnog opterećenja i pri različitim režimima rada. Sve to su uvjeti za ispravan odabir pogonskog sustava za vozilo. [16]

#### 3.2.2. Matematički izrazi za računanje otpora vožnje

Sila otpora kotrljanja:

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \quad [\text{N}]$$

Snaga otpora kotrljanja:

$$P_k = F_k \cdot v \quad [\text{kW}]$$

Sila otpora zraka:

$$F_z = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot c_w \cdot A \quad [\text{N}]$$

Snaga otpora zraka:

$$P_z = F_z \cdot v \quad [\text{kW}]$$

Sila otpora uspona:

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

Snaga otpora uspona:

$$P_u = F_u \cdot v \quad [\text{kW}]$$

Sila otpora ubrzanja:

$$F_a = m_v \cdot a \quad [\text{N}]$$

Snaga otpora ubrzanja:

$$P_a = F_a \cdot v \quad [\text{kW}]$$

Ukupna sila otpora vožnje:

$$F_{ukupno} = F_k + F_z + F_u + F_a \quad [\text{N}]$$

Ukupna snaga otpora vožnje:

$$P_{ukupno} = P_k + P_z + P_u + P_a \quad [\text{kW}]$$

Ukupna potrošnja energije:

$$E_{ukupno} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \frac{F_{i ukupno} \cdot s_i \cdot 1000}{f_{btw}} & (F_{ukupno} > 0) \\ 0 & (ostalo) \end{cases} + \sum_{i=1}^n \begin{cases} \frac{F_{i ukupno} \cdot s_i \cdot f_{btw} \cdot f_{reg}}{1000} & (F_{ukupno} < 0) \\ 0 & (ostalo) \end{cases} \quad [\text{kJ}]$$

Energija u kWh:

$$1 \text{ kJ} = 0,000278 \text{ kWh}$$

### 3.2.3. Linije javnog gradskog prijevoza

U sklopu rada ispitane su sljedeće linije (zelena: gradske ravničarske, siva: gradske brdske; narančasta: izvangradske ravničarske linije):

Linija javnog gradskog prijevoza	Autobus
109; Črnomerec – Dugave – Črnomerec	MB O530G (zglobni)
218; Gl. Kolodvor – Savica – Gl. Kolodvor	MB O530G (zglobni)
115; Ljubljana – Špansko – Ljubljana	MB O530LE (standardni)
102; Mihaljevac – Britanski trg – Mihaljevac	MB O530LE (standardni)
127; Črnomerec – Mikulići – Črnomerec	MB O530LE (standardni)
112; Savski most – Lučko – Savski most	MB O530LE (standardni)
268; (Zagreb Gl. Kolodvor – Velika Gorica – Zagreb Gl. Kolodvor)	MB O530G (zglobni)

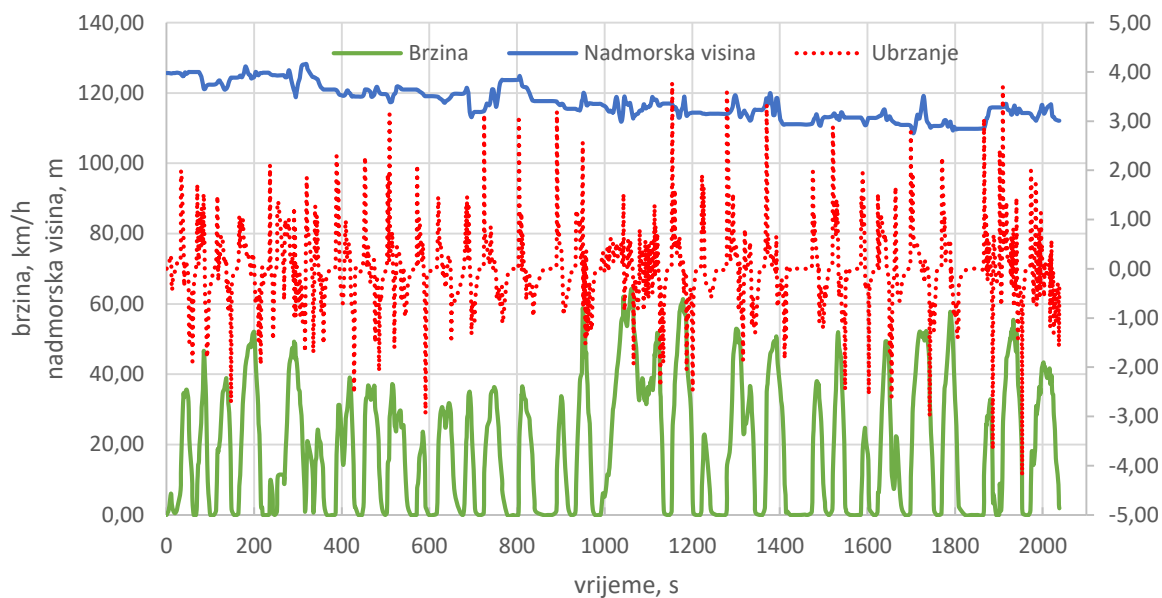
tablica 11. popis ispitanih linija



## 3.2.3.1. Gradske ravničare linije

## Linija 109: Čnomerec – Dugave – Čnomerec

## smjer Dugave

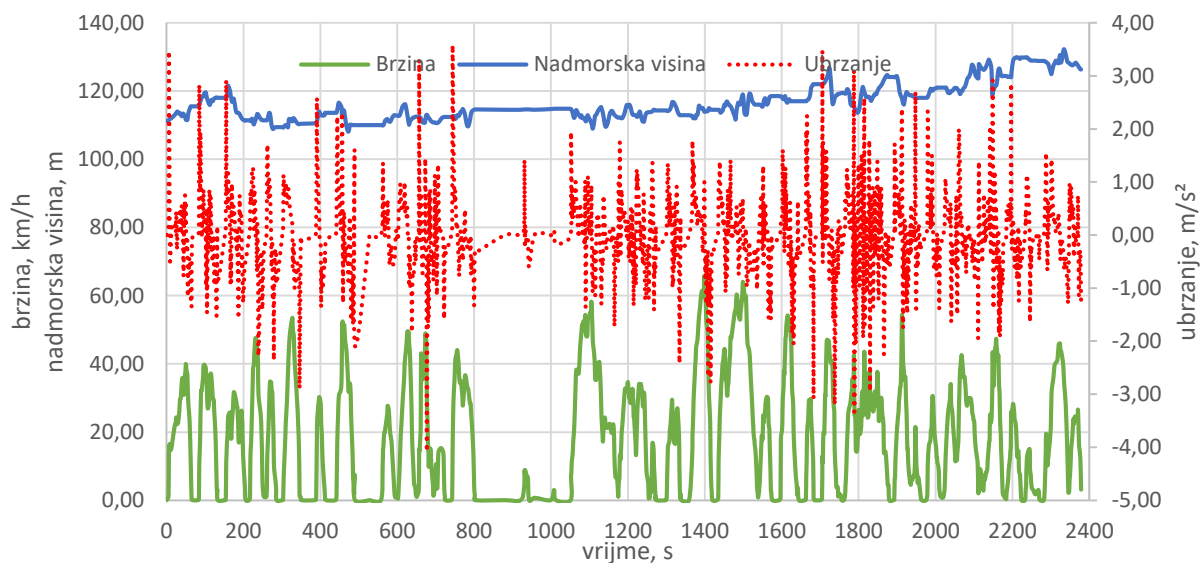


Slika 21. dijagramski prikaz, 109 smjer Dugave

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530G
Popunjenost autobusa	40 %
Broj stanica	20
Stanje u prometu	Srednje gust promet
Vrijeme	13:00:00
Ukupni put ciklusa	10774 m
Vrijeme stajanja	424 s
Broj ciklusa tokom radnog dana	12
Ukupan put radnog dana	64,6 km
Potrošnja energije po km	2,161 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	23,283 kWh
Ukupna potrošnja energije	139,7 kWh

tablica 12: podaci s ispitivanja, 109 smjer Dugave

## smjer Črnomerec



Slika 22. dijagramski prikaz, 109 smjer Črnomerec

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530G
Popunjenost autobusa	40 %
Broj stanica	20
Stanje u prometu	Srednje gust promet
Vrijeme	13:45:00
Ukupni put ciklusa	12097 m
Vrijeme ciklusa	
Vrijeme stajanja	602
Broj ciklusa tokom 8 sati	6
Ukupan put radnog dana	72,6 km
Potrošnja energije po km	2,665 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	32,241
Ukupna potrošnja energije	193,4 kW/h

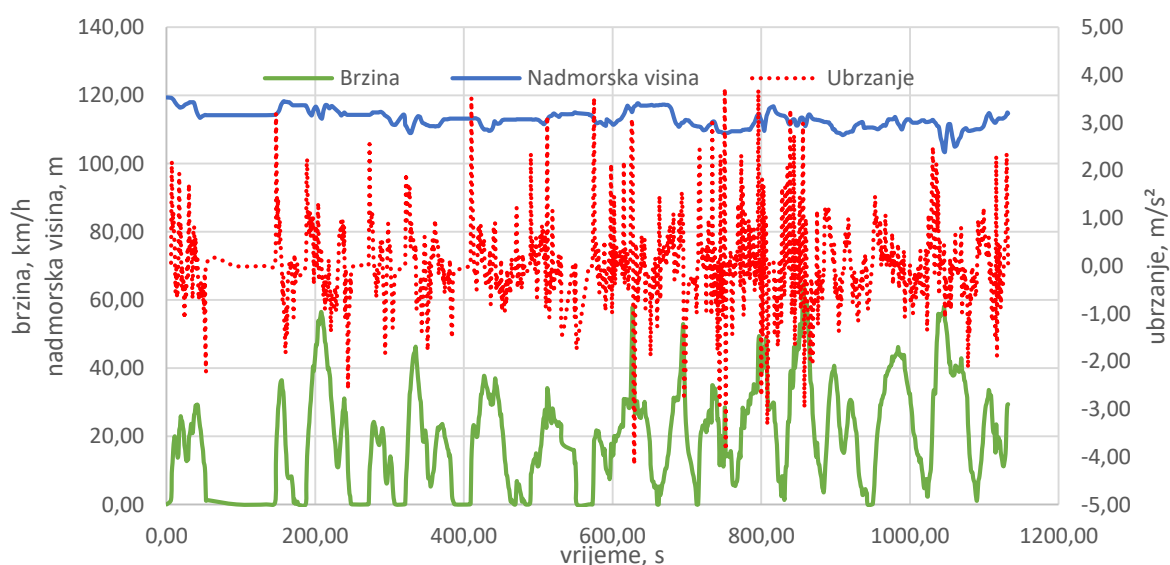
tablica 13: podaci s ispitivanja, 109 smjer Črnomerec

**Komentar:** Linija 109 jedna je od najdužih gradskih linija. Na njoj zbog velikog broja putnika vozi isključivo zglobni autobus. Ovisno o dijelu dana u kojem se vozi popunjenost autobusa značajno varira no kroz dan se može uzeti prosjek od 40-50 %. Ukupan utrošak energije kroz 8 sati radnog vremena po autobusu iznosi oko 330 kWh (zbroy potrošnje u jednom i drugom smjeru) što daje za zaključiti da na ovoj liniji baterijski pogonjen autobus koji se puni preko noći nije isplativa investicija. U prilog tome ide i to što u analizu podataka nije uzeta energija koja bi se trošila na grijanje i hlađenje, ovisno o godišnjem dobu, a koja zauzima veliki postotak

potrošnje ako je izvor napajanja jednak izvoru napajanja pogonskog sustava. U obzir dolazi *Opportunity-charging* električni autobus, uz uvjet izgrađene infrastrukture brzih punionica na okretištima gdje se autobus zadržava i gdje se u kratkom vremenu uspije napuniti kako bi odvezao trasu.

### Linija 218: Gl. Kolodvor – Savica – Gl. Kolodvor

#### smjer Savica

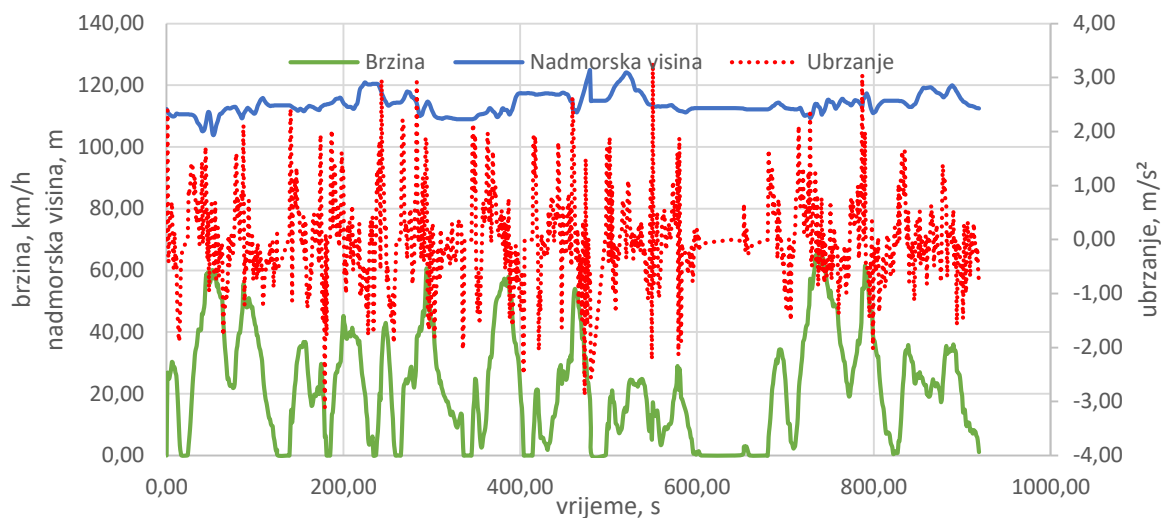


Slika 23. dijagramski prikaz, 218 smjer Savica

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530G
Popunjenost autobusa	70 %
Broj stanica	16
Stanje u prometu	gust promet
Vrijeme	16:02:00
Ukupni put ciklusa	6338 m
Vrijeme ciklusa	1132 s
Vrijeme stajanja	314 s
Broj ciklusa tokom radnog dana	10
Ukupan put radnog dana	63,4 km
Potrošnja energije po km	3,631 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	23,016 kWh
Ukupna potrošnja energije	230,2 kWh

tablica 14: podaci s ispitivanja, 218 smjer Savica

## smjer Glavni kolodvor



Slika 24. dijagramski prikaz, 218 smjer Gl. kolodvor

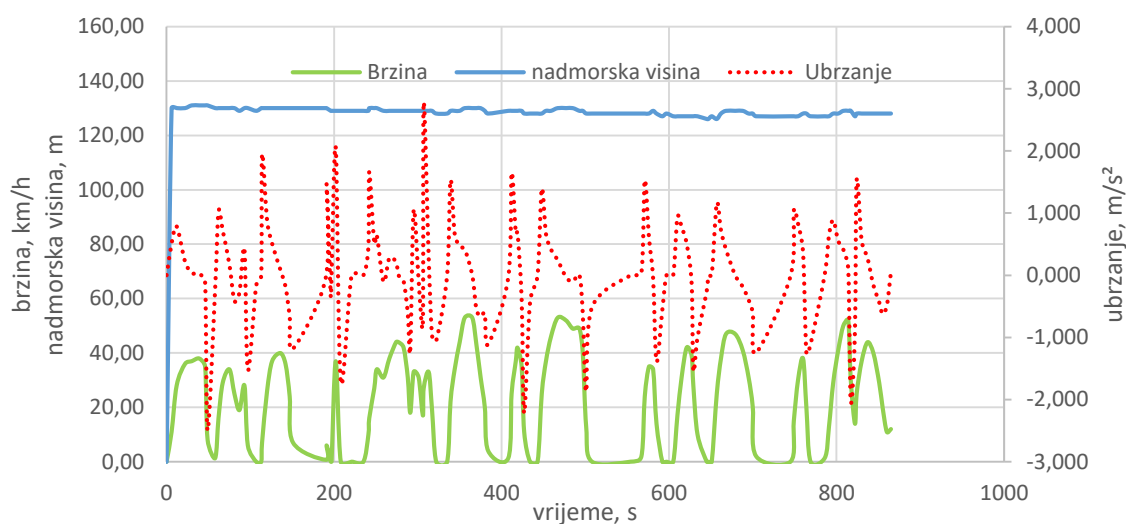
Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530G
Popunjenost autobusa	50 %
Broj stanica	16
Stanje u prometu	gust promet
Vrijeme	16:25:00
Ukupni put ciklusa	6008 m
Vrijeme ciklusa	919 s
Vrijeme stajanja	286 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	10
Ukupan put radnog dana	60,1 km
Potrošnja energije po km	3,286 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	19,745 kWh
Ukupna potrošnja energije	170,9 kWh

tablica 15: podaci s ispitivanja, 218 smjer Gl. kolodvor

**Komentar:** Linija 218 povezuje Gl. Kolodvor i naselja Savicu i Borovje. U razgovoru s vozačem doznaje se da je u prometu isključivo zglobni autobus, što kroz cijeli dan zasigurno nije potrebno. Linija je opterećena velikim brojem putnika u periodu odlaska i povratka s posla. Ostalim dijelovima dana kapacitet popunjenosti je u prosjeku 30 % što bitno mijenja iznos ukupne potrošnje energije prikazan u tablicama. Realna potrošnja energije tokom dana (bez grijanja i hlađenja) iznosi oko 290 kWh. Bitna je i činjenica kako bi klimatizacijski uređaj trošio dodatnih 20 % ovdje izračunate energije, ugradnja samo baterija u autobus na ovoj liniji

iznosila bi oko 63000 € što je vrlo visoka investicija. U obzir dolazi *opportunity-charging* s izgrađenom infrastrukturom brzih punionica.

**Linija 115: Ljubljana – Špansko – Ljubljana**  
**smjer Špansko**

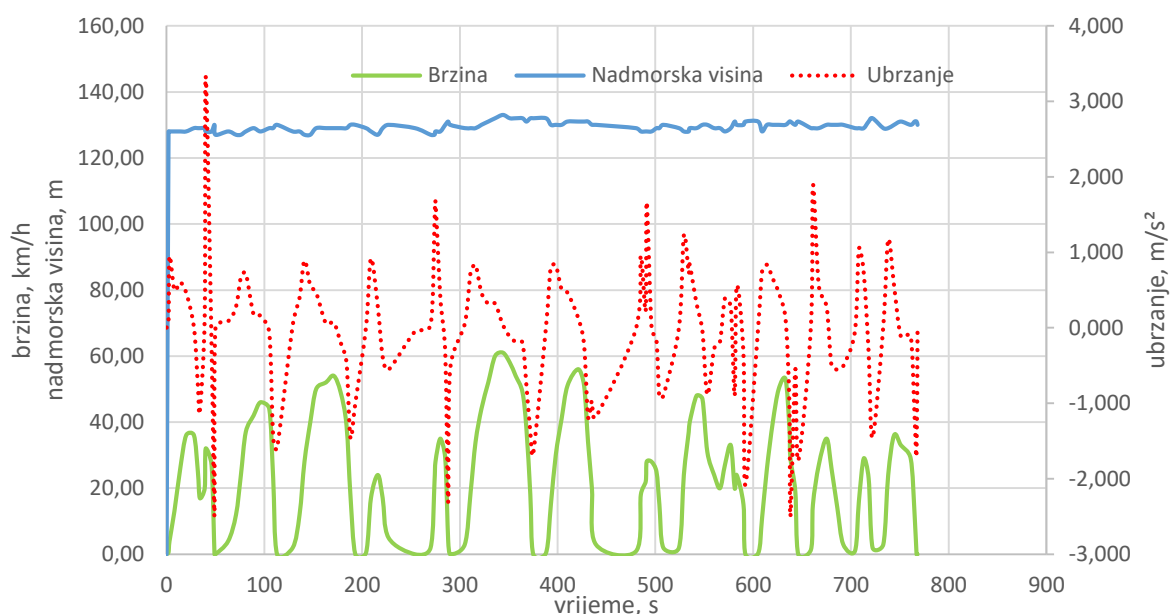


Slika 25. dijagramski prikaz, 115 smjer Špansko

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	40 %
Broj stanica	12
Stanje u prometu	Srednje gust promet
Vrijeme	19:20:00
Ukupni put ciklusa	4913 m
Vrijeme ciklusa	865 s
Vrijeme stajanja	244 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	10
Ukupan put radnog dana	49,1 km
Potrošnja energije po km	2,277 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	11,185 kWh
Ukupna potrošnja energije	111,8 kWh

tablica 16: podaci s ispitivanja, 115 smjer Špansko

## Smjer Ljubljana



Slika 26. dijagramski prikaz, 115 smjer Ljubljana

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	20 %
Broj stanica	12
Stanje u prometu	Srednje gust promet
Vrijeme	19:43:00
Ukupni put ciklusa	4738 m
Vrijeme stajanja	258 s
Broj ciklusa tokom radnog dana	10
Ukupan put radnog dana	47,4 km
Potrošnja energije po km	1,850 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	8,764
Ukupna potrošnja energije	88 kWh

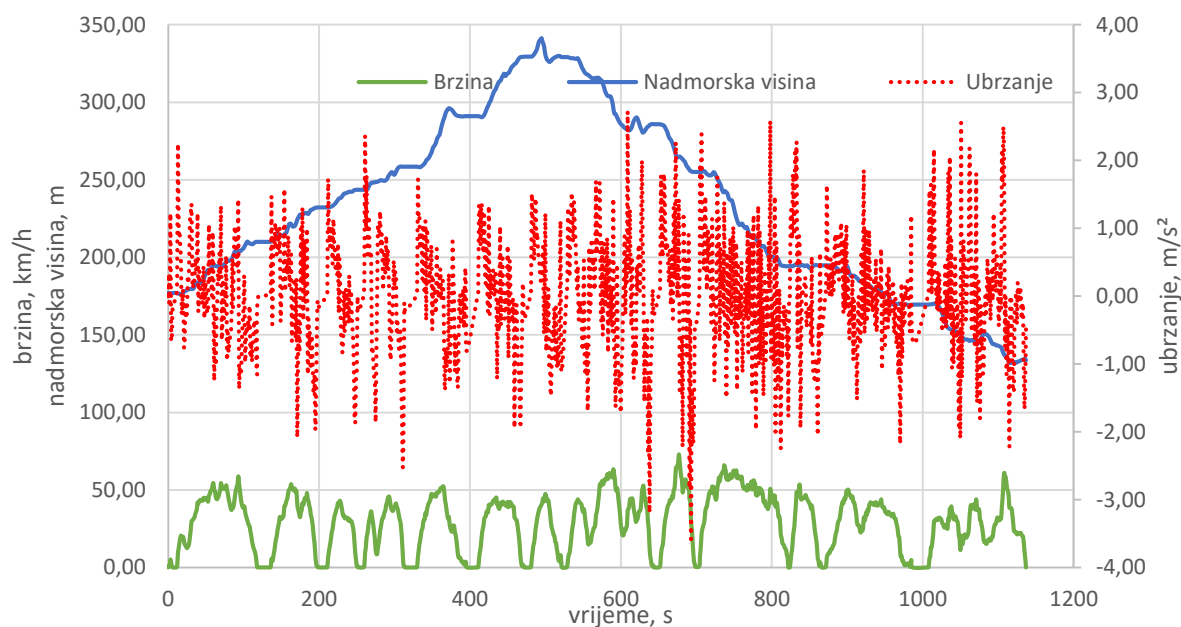
tablica 17: podaci s ispitivanja, 115 smjer Ljubljana

**Komentar:** Linija 115 najkraća je obzirom na prethodne dvije i na njoj voze jedni i drugi tipovi autobusa. Ispitivanje je provedeno u autobusu standardne duljine 12 m. Ukupna potrošnja energije od 220 kWh (bez klimatizacijskog uređaja) kroz 8 sati vremena uzeta je uz varijablu prosječne popunjenosti autobusa od 40 % kroz dan. Iz rezultata se može zaključiti kako je ova kratka linija najpodobnija za baterijski pogonjen autobus koji se puni po noći. Ugradnja sustava baterija iznosila bi oko 40000 € što je investicija koja bi se kroz nekoliko godina isplatila.

## 3.2.3.2 Gradske brdske linije

## Linija 102: Mihaljevac – Britanski trg – Mihaljevac

## smjer Britanski trg

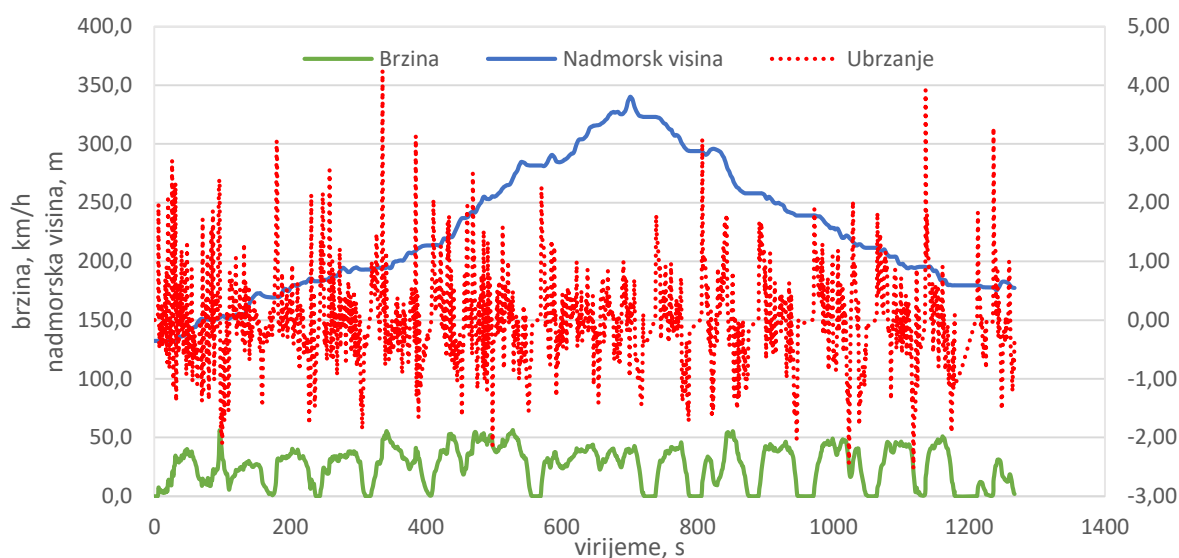


Slika 27. dijagramski prikaz, 102 smjer Britanski trg

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	50 %
Broj stanica	21
Stanje u prometu	rijedak promet
Vrijeme	11:05:00
Ukupni put ciklusa	9249 m
Vrijeme stajanja	272 s
Vrijeme ciklusa	1137 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	10
Ukupan put radnog dana	92,5 km
Potrošnja energije po km	2,241 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	20,731 kWh
Ukupna potrošnja energije	207,3 kWh

tablica 18: podaci s ispitivanja, 102 smjer Britanski trg

## smjer Mihaljevac



Slika 28. dijagramski prikaz, 102 smjer Mihaljevac

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	40 %
Broj stanica	21
Stanje u prometu	rijedak promet
Vrijeme	11:33:00
Ukupni put ciklusa	9172 m
Vrijeme ciklusa	1267 s
Vrijeme stajanja	241 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	10
Ukupan put radnog dana	91,7 km
Potrošnja energije po km	2,431 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	22,297 kWh
Ukupna potrošnja energije	223,0 kWh

tablica 19: podaci s ispitivanja, 102 smjer Mihaljevac

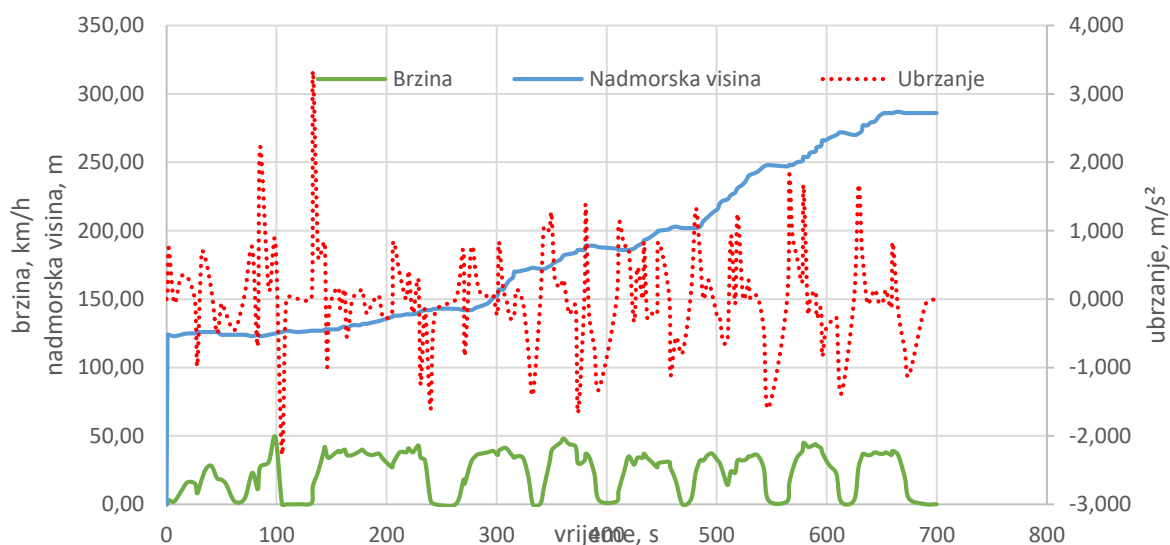
**Komentar:** Linija 102 specifična je brdska linija koja u oba smjera ima veliku promjenu nadmorske visine. U periodu vožnje kada autobus svladava nadmorsku visinu potrošnja energije je preko 80 % posto ukupnog iznosa, dok u slučaju spuštanja zahvaljujući sustavu regenerativnog kočenja velika količina kinetičke energije vraćena je natrag u sustav baterija. Bez obzira na to autobus na ovoj liniji iziskuje kapacitet baterija veći od 400 kWh s prosječnom popunjenošću autobusa od 40 % i to za 8 sati radnog vremena što investiciju ne čini isplativom



ako se radi o autobusu koji se puni preko noći. U slučaju izgrađene infrastrukture punioca na okretištima (Mihaljevac i Britanski trg posjeduju u blizini su mreže žica za pogon tramvaja) ili uz trasu uz optimalan kapacitet baterija ovaj autobus bi uspio prometovati s električnim pogonskim sustavom.

### Linija 127: Črnomerec – Mikulići – Črnomerec

#### smjer Mikulići

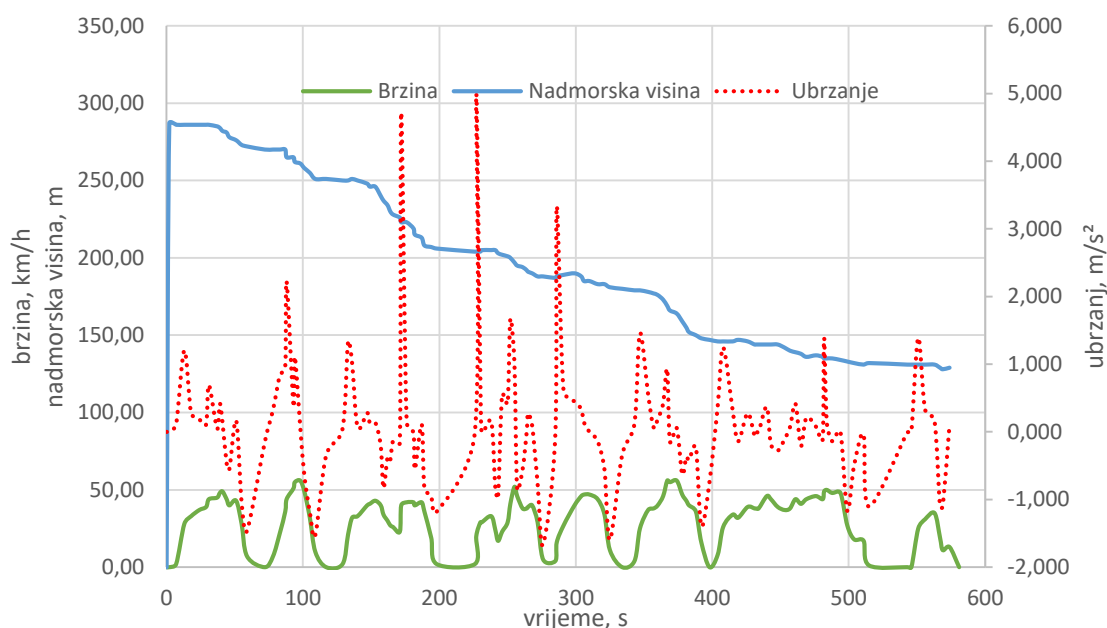


Slika 29. dijagramski prikaz, 127 smjer Mikulići

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	40 %
Broj stanica	9
Stanje u prometu	rijedak promet
Vrijeme	8:12:00
Ukupni put ciklusa	4469 m
Vrijeme ciklusa	700 s
Vrijeme stajanja	115 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	16
Ukupan put radnog dana	71,5 km
Potrošnja energije po km	3,302 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	14,757 kWh
Ukupna potrošnja energije	236, 12 kWh

tablica 20: podaci s ispitivanja, 127 smjer Mikulići

## smjer Črnomerec



Slika 30. dijagramski prikaz, 127 smjer Črnomerec

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	70 %
Broj stanica	9
Stanje u prometu	rijedak promet
Vrijeme	8:32:00
Ukupni put ciklusa	4223 m
Vrijeme stajanja	106 s
Vrijeme ciklusa	581 s
Broj ciklusa tokom radnog dana	16
Ukupan put radnog dana	67,6 km
Potrošnja energije po km	0,869 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	3,669 kWh
Ukupna potrošnja energije	59 kWh

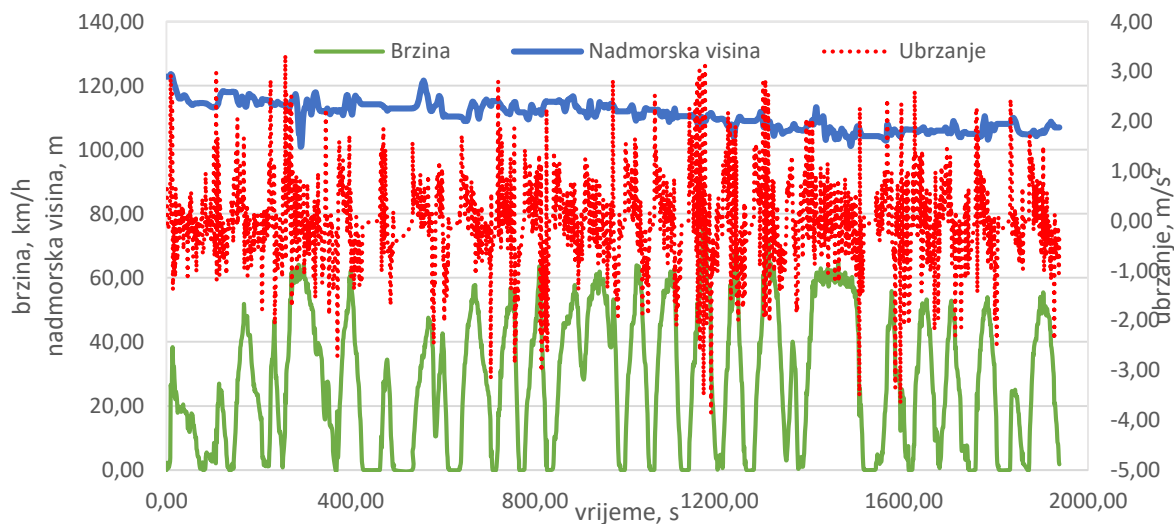
tablica 21: podaci s ispitivanja, 127 smjer Črnomerec

**Komentar:** Linija 127 ispitana je kako bi se prikazala razlika režima kada autobus savladava uzbrdicu te kad se niz nju spušta i pri tome sustavom regenerativnog kočenja prikuplja energiju. Ukupna potrošnja energije po autobusu kroz 8 sati uz prosječnu popunjenost od 40 % iznosi oko 350 kWh (s klimatizacijskim uređajem) što predstavlja veliku investiciju u slučaju autobusa koji se puni preko noći. Moguć je *Opportunity- charging* sustav uz izgrađenu punionicu na Črnomercu.

## 3.2.3.3 Izvangradska linija

## Linija 268: Zagreb Gl. kolodvor – Velika Gorica – Zagreb Gl. Kolodvor

## smjer Velika Gorica

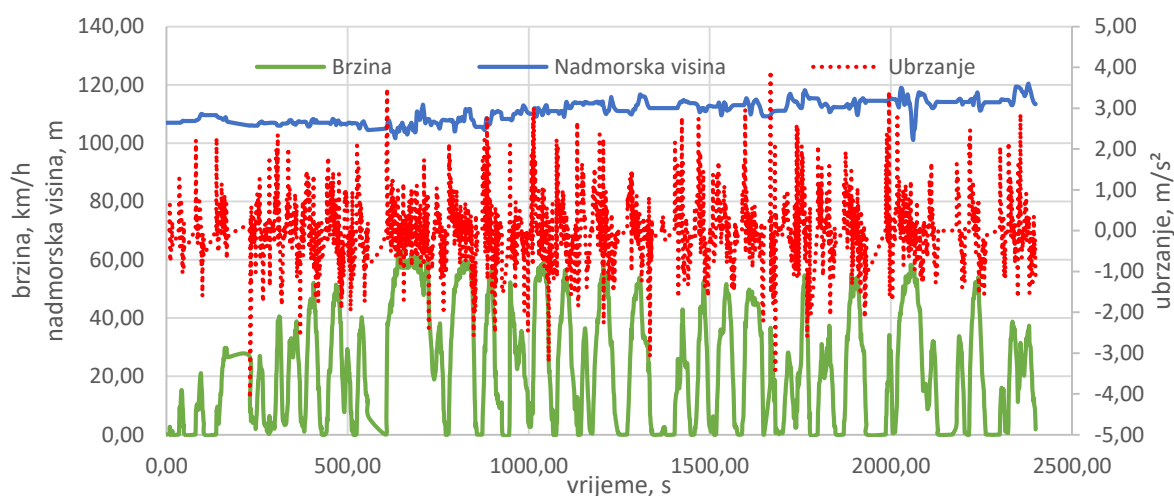


Slika 31. dijagramski prikaz, 268 smjer Velika Gorica

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530G
Popunjenost autobusa	60 %
Broj stanica	20
Stanje u prometu	Srednje gust promet
Vrijeme	15:22:00
Ukupni put ciklusa	15390 m
Vrijeme ciklusa	1938 s
Vrijeme stajanja	434 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	6
Ukupan put radnog dana	92,3 km
Potrošnja energije po km	3,056 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	47,035
Ukupna potrošnja energije	282,2 kWh

tablica 22: podaci s ispitivanja, 268 smjer Velika Gorica

## smjer Zagreb Gl. kolodvor

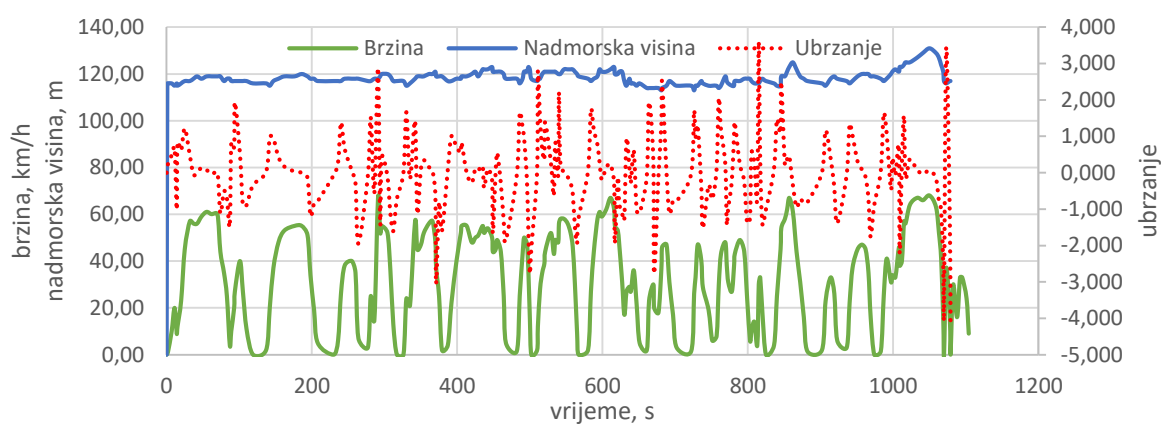


Slika 32. dijagramski prikaz, 268 smjer Gl. kolodvor

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530G
Popunjenost autobusa	80 %
Broj stanica	22
Stanje u prometu	gust promet
Vrijeme	16:05:00
Ukupni put ciklusa	14310 m
Vrijeme ciklusa	2400 s
Vrijeme stajanja	620 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	6
Ukupan put radnog dana	85,8 km
Potrošnja energije po km	3,586 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	51,315 kWh
Ukupna potrošnja energije	307,9 kWh

tablica 23: podaci s ispitivanja, 268 smjer Gl. kolodvor

**Komentar:** Linija 268 povezuje grad Veliku Gorica u sastavu Zagrebačke županije s Gradom Zagrebom. Na njoj zbog velikog broja putnika koji gravitiraju Gradu Zagrebu prometuju isključivo zglobni autobusi koji polaze s Gl. Kolodvora u prosjeku svakih 7 minuta. Iz rezultata ispitivanja vidljiva je velika potrošnja energije koja daje za zaključiti kako ova linija nikako nije podobna za elektrifikaciju u slučaju autobusa koji se puni tokom noći naročito ako se u obzir uzme činjenica kako autobus na cesti provodi preko 18 sati, a u slučaju *Opportunity-charging* autobusa zahtijeva velike investicije jednog i drugog grada što u budućnosti može biti isplativo.

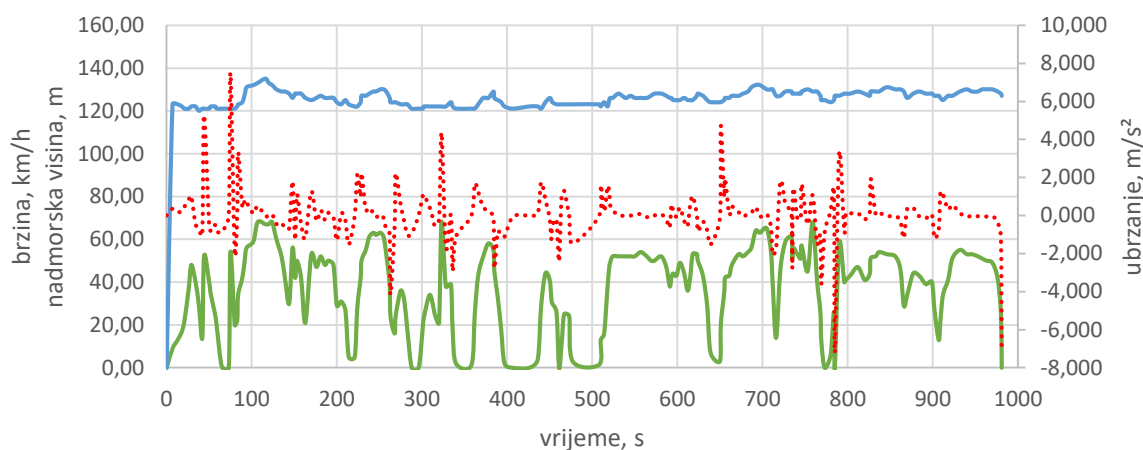
**Linija 112: Savski most – Lučko – Savski most****smjer Lučko**

Slika 33. dijagramski prikaz, 112 smjer Lučko

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	30 %
Broj stanica	13
Stanje u prometu	rijedak promet
Vrijeme	14:15:00
Ukupni put ciklusa	9643 m
Vrijeme ciklusa	1104 s
Vrijeme stajanja	279 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	8
Ukupan put radnog dana	77,1 km
Potrošnja energije po km	2,253 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	21,723 kWh
Ukupna potrošnja energije	173,8 kWh

tablica 24: podaci s ispitivanja, 112 smjer Lučko

## smjer Savski most



Slika 34. dijagramski prikaz, 112 smjer Savski most

Model autobusa	Mercedes - Benz Citaro O530LE
Popunjenost autobusa	35 %
Broj stanica	13
Stanje u prometu	rijedak promet
Vrijeme	14:15:00
Ukupni put ciklusa	9899 m
Vrijeme ciklusa	981 s
Vrijeme stajanja	247 s
Broj ciklusa kroz 8 sati	13
Ukupan put radnog dana	79,2 km
Potrošnja energije po km	2,438 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	24,130 kWh
Ukupna potrošnja energije	193 kWh

tablica 25: podaci s ispitivanja, 112 smjer Savski most

**Komentar:** Linija 112 izvangradska je linija koja povezuje naselje Lučko u sastavu Grada Zagreba sa prometnim čvorištem Savsi most. Na ovoj liniji najveće opterećenje u vožnji nastaje u vremenima odlaska i dolaska s posla kada potrošnja energije poraste i do 3 kWh/km. Prosječna potrošnja energije u 8 sati radnog vremena iznosi oko 340 kWh što znači potrebu za baterije velikog kapaciteta, a samim time i visoku investiciju.

Iz rezultata ispitivanja priloženih u ovom poglavlju vidljivo je da su samo gradske ravničarske linije i to one kraće pogodne za elektrifikaciju autobusa sa setovima baterija koji već postoje na tržištu a prikazani su na primjerima autobusa u poglavlju 2.2.3.. Činjenica je da autobusi voze više od 8 sati tijekom radnog dana, a u tom slučaju moguće je uvesti smjene na način da se autobus nakon potrošenog kapaciteta baterije vrati u garažu na punjenje, a drugi koji je pun vozi. Naravno, potrebno je ispitati isplativost takvog sustava i ustanoviti je li isplativije izgraditi mrežu brzih punionica na okretištima autobusa koja su ujedno okretišta tramvaja i gdje postoji već visokonaponska električna mreža. Na taj način u autobuse bi se ugrađivale baterija manjeg kapaciteta, a ujedno dovoljnog za jedan ciklus odlaska i povratka do brze punionice na terminalu.

### 3.3. Energetske potrebe autobusa za različite scenarije

U ovom poglavlju tablično će se prikazati koliko popunjenost autobusa na jednoj od linija utječe na potrošnju električne energije. Za primjer će se uzeti linija 112, smjer Špansko i to za slučajeve praznog, polupunog i punog autobusa standardne duljine. Linija je duljine 9900 m, prosječno trajanje je oko 1000 s, na linije je 13 stanica i ukupan put tijekom 8 sati je 64km.

Scenariji	Prazan autobus	polupun autobus	pun autobus
Masa autobusa	12000 kg	15000 kg	18000 kg
Potrošnja energije po km	1,833 kWh/km	2,277 kWh/km	2,720 kWh/km
Potrošnja energije po ciklusu	9,006 kWh	11,185 kWh	13,364 kWh
Ukupna potrošnja energije	117,08 kWh	145,40 kWh	173,73 kWh

tablica 26. energetske potrebe za različit broj putnika

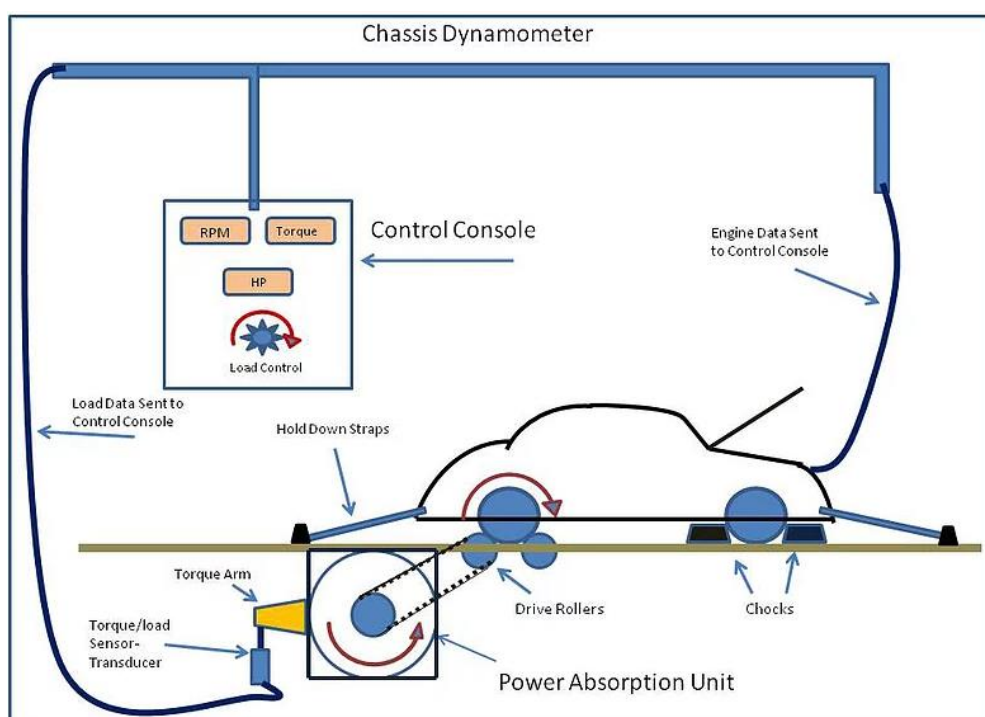
Iz prethodne tablice se vidi koliko broj putnika utječe na potrošnju energije autobusa. Naravno, podrazumijeva se kako ni u jednom od ovih slučajeva autobus ne vozi konstantno jer se broj putnika kroz različite periode dana mijenja. Kako je više puta spomenuto, opterećenje je najveće u jutarnjim satima kada putnici odlaze na posao te popodne kada se s posla vraćaju. Za modeliranje pogonskog sustava i kapaciteta baterija pojedinog autobusa koji bi se punio tijekom noći potrebno je provesti opsežnije istraživanje u trajanju od nekoliko dana, najbolje preko sustava za poništavanje karata te tako iz realnih uvjeta popunjenosti autobusa ustanoviti energetske potrebe.



## 4. USPOREDBA SA STANDARDNIM EUROPSKIM CIKLUSIMA VOŽNJE

### 4.1. Standardni ciklusi vožnje

Standardni ispitni ciklusi vožnje temelje se na ispitivanjima provedenim na Sjeverno američkom, azijskom i europskom kontinentu. Radi se o ispitivanju uvjeta u vožnji, ovisno o tipu vozila (motocikli, osobna vozila, terenska vozila, autobusi), režimu vožnje (gradska vožnja, otvorena cesta, teren) namijenjena prvenstveno ispitivanju emisije štetnih plinova u prometu, a koriste se i kod ispitivanja motora, potrošnje, izdrživosti pogonskog sustava i sl. Ispitivanja se provode u laboratorijima i to pomoću sustava šasijskog dinamometra prikazanog na slici ispod.



Slika 35. shema šasijskog dinamometra [17]

Pogonski kotači su u kontaktu s valjcima koji su postavljeni tako da simuliraju otpore kotrljanja i otpore zraka pri vožnji. Podaci za analizu emisije štetnih plinova dobiju se tako da vozilo 'vozi' na valjcima po prethodno definiranom voznom ciklusu koji predstavlja određene režime vožnje u realnim uvjetima na cesti. Ovisno o brzini i promjeni opterećenja motora ciklusi se mogu podijeliti na *steady-state* (konstantno stanje opterećenja) i *transient* (promjenjivo stanje opterećenja). *Steady-state* ciklus karakterističan je za ispitivanje radnih strojeva koji su u konstantnom opterećenju (brzina, teret, otpori vožnje) i u sklopu ovog rada se neće razmatrati. *Transient* ciklus vožnje s kontinuirano promjenjivim opterećenjem može se podijeliti na tri podtipa. Prvi je visoko stilizirani ciklus vožnje poput *NEDC-a* (*New European Driving Cycle*), korišten na području Europske unije za ispitivanje emisije osobnih automobila.

Karakteristične krivulje NEDC ciklusa su konstantna ubrzanja, usporavanja te brzina u gradskoj vožnji i na autocesti te u pravilu ne odgovaraju realnim uvjetima u prometu pa je ovdje riječ o idealnom ciklusu.

Drugi tip *transient* ciklusa vožnje jest *pseudo-stady-state* ciklus. U ovom ciklusu nastojanje je u održavanju konstantne brzine u slobodnom prometu (otvorena cesta, autocesta).

Treći tip *transient* ciklusa predstavlja ciklus vožnje koji je baziran na podacima dobivenim u vožnji u realnim uvjetima na cesti i na temelju njih se modelira. Pošto su ispitivanja u sklopu ovog rada provedena u realnim uvjetima na cesti u vožnji gradskim autobusima ovaj tip ispitnog ciklusa mjerodavan je za usporedbu. Za analizu su uzeti Braunschweig i TNO ciklus.

#### 4.1.1. Braunschweig ciklus

Braunschweig ciklus proveden po realnim uvjetima vožnje u istoimenom njemačkom gradu predstavlja gradsku vožnju autobusom i prikazuje podatke poput prosječne brzine, vrijeme ciklusa, broj stanica itd. Karakteristične vrijednosti vožnje prikazane su slikom ispod.

Total distance	10900.32 m	Average negative acceleration	-0.595 m/s <sup>2</sup>
Total time	1740 s	Standard deviation of accel.	0.687 m/s <sup>2</sup>
Driving time	1452 s	Standard dev. of positive accel.	0.395 m/s <sup>2</sup>
Drive time	245 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.390 m/s <sup>2</sup>
Drive time spent accelerating	712 s	Number of accelerations	52
Drive time spent decelerating	495 s	Accelerations per km	4.771 /km
Time spent braking	369 s	Number of stops	26
Standing time	288 s	Stops per km	2.39 /km
% of time driving	83.45 %	Average stop duration	11.08 s
% of cruising	14.08 %	Average distance between stops	419.24 m
% of time accelerating	40.92 %	Relative positive acceleration	0.2062 m/s <sup>2</sup>
% of time decelerating	28.45 %	Positive kinetic energy	5.360 m/s <sup>2</sup>
% of time braking	21.21 %	Relative positive speed	0.614
% of time standing	16.55 %	Relative real speed	0.784
Average speed (trip)	22.6 km/h	Relative square speed	10.340 m/s
Average driving speed	27.03 km/h	Relative positive square speed	6.478 m/s
Standard deviation of speed	16.61 km/h	Relative real square speed	8.385 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	37.31 km/h	Relative cubic speed	116.81 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Maximum speed	58.21 km/h	Relative positive cubic speed	74.20 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Average acceleration	0.000 m/s <sup>2</sup>	Relative real cubic speed	96.77 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Average positive acceleration	0.424 m/s <sup>2</sup>	Root mean square of acceleration	0.251 m/s <sup>2</sup>

Slika 36. karakteristične vrijednosti Braunschweig ciklusa [18]

#### 4.1.2. TNO ciklus

TNO ciklus proveden po realnim uvjetima vožnje na autobusnoj liniji duljine 5250 m u Nizozemskoj. Podaci su također usporedivi i mjerodavni za korištenje u svrhu ispitivanja emisije štetnih plinova, potrošnje u javnim gradskim prijevozima gradova pa tako i Zagreba. Karakteristične vrijednosti prikazane su na slici na sljedećoj stranici.

Total distance	5247.94 m	Average negative acceleration	-0.633 m/s <sup>2</sup>
Total time	898 s	Standard deviation of accel.	0.730 m/s <sup>2</sup>
Driving time	706 s	Standard dev. of positive accel.	0.383 m/s <sup>2</sup>
Drive time	87 s	Accel: 75th - 25th percentile	0.589 m/s <sup>2</sup>
Drive time spent accelerating	343 s	Number of accelerations	33
Drive time spent decelerating	276 s	Accelerations per km	6.288 /km
Time spent braking	217 s	Number of stops	14
Standing time	192 s	Stops per km	2.67 /km
% of time driving	78.62 %	Average stop duration	13.71 s
% of cruising	9.69 %	Average distance between stops	374.85 m
% of time accelerating	38.20 %	Relative positive acceleration	0.2549 m/s <sup>2</sup>
% of time decelerating	30.73 %	Positive kinetic energy	6.660 m/s <sup>2</sup>
% of time braking	24.16 %	Relative positive speed	0.551
% of time standing	21.38 %	Relative real speed	0.707
Average speed (trip)	21.0 km/h	Relative square speed	10.457 m/s
Average driving speed	26.76 km/h	Relative positive square speed	5.763 m/s
Standard deviation of speed	17.08 km/h	Relative real square speed	7.567 m/s
Speed: 75th - 25th percentile	37.7 km/h	Relative cubic speed	122.37 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Maximum speed	61.81 km/h	Relative positive cubic speed	67.63 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Average acceleration	0.000 m/s <sup>2</sup>	Relative real cubic speed	89.90 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Average positive acceleration	0.516 m/s <sup>2</sup>	Root mean square of acceleration	0.268 m/s <sup>2</sup>

Slika 37. karakteristične vrijednosti TNO ciklusa [18]

#### 4.1.3. Karakteristične vrijednosti ispitanih linija

Za usporedbu ispitanih linija na području Grada Zagreba neće se razmatrati sve vrijednosti navedene na slici iznad, linije su uspoređene za sljedeće karakteristične vrijednosti, a izrazi po kojima su računate navedeni su ispod, a uzeti su iz studije [15]. Slično je prikazano i objašnjeno u studiji [18].

Vrijeme stajanja:

$$T_{stajanja} = \sum_{i=1}^n \begin{cases} T_i (v_i = 0) \\ 0 \text{ (ostalo)} \end{cases} \quad [\text{s}]$$

Vrijeme vožnje:

$$T_{vožnje} = T_{ukupno} - T_{stajanja} \quad [\text{s}]$$

Prosječna brzina:

$$v_{srednja} = \frac{s}{T_{vožnje}} \quad [\text{km/h}]$$

Standardna devijacija brzine:

$$v_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad [\text{km/h}]$$

Prosječna pozitivna akceleracija:

$$a_{sr\_poz} = \left( \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i > 0) \\ 0 & (ostalo) \end{cases} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i & (a_i > 0) \\ 0 & (ostalo) \end{cases} \quad [\text{m/s}^2]$$

Prosječna negativna akceleracija:

$$a_{sr\_neg} = \left( \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i < 0) \\ 0 & (ostalo) \end{cases} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i & (a_i < 0) \\ 0 & (ostalo) \end{cases} \quad [\text{m/s}^2]$$

Standardna devijacija pozitivne akceleracije:

$$a_{sd\_poz} = \sqrt{\frac{1}{n_{ai\_poz}} \sum_{i=1}^n (a_{i\_poz} - a_{sr\_poz})^2} \quad [\text{m/s}^2]$$

Standardna devijacija akceleracije:

$$a_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad [\text{m/s}^2]$$

Slijede tablični prikazi izračunatih karakterističnih vrijednosti za sve ispitane linije u sklopu rada, a predstavljaju gradsku brdsku, gradsku ravničarsku te izvangradsku ravničarsku liniju.

**Gradske brdske linije:**

Ciklus ( linija; smjer )	102; smjer Britanski trg	102; smjer Mihaljevac	127; smjer Mikulići	127; smjer Črnomerec
Duljina ciklusa [m]	9222	9172	4469	4223
Vrijeme ciklusa [s]	1137	1267	700	581
Vrijeme stajanja [s]	272	241	115	106
Vrijeme vožnje [s]	865	1026	585	475
Broj stanica [s]	21	21	9	9
Prosječna brzina [s]	32,06	29,29	26,93	31,19
Najveća brzina [s]	68	56,4	49	56
Standardna devijacija brzine [km/h]	16,407	14,197	13,876	15,805
Prosječna poz. Akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	0,66	0,592	0,58	0,669
Prosječna neg. akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	-0,652	-0,561	-0,497	-0,604
Prosječna akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	0,002	-0,001	0,062	0,085
Standardna devijacija pozitivne akc. [m/s <sup>2</sup> ]	0,5321	0,6082	0,5833	0,9575
Standardna devijacija akceleracije [m/s <sup>2</sup> ]	0,838	0,776	0,73	0,963

tablica 27. karakteristične vrijednosti gradskih brdskih linija

**Gradske ravničarske linije:**

Ciklus ( linija; smjer )	109; smjer Dugave	109, smjer Črnomerec	218; smjer Savica	218; smjer Gl. Kolodvor	115; smjer Špansko	115; smjer Ljubljana
Duljina ciklusa [m]	10774	12096	6338	6008	4913	4738
Vrijeme ciklusa [s]	2038	2379	1132	919	865	768
Vrijeme stajanja [s]	424	602	314	286	244	231
Vrijeme vožnje [s]	1614	1777	818	633	621	537
Broj stanica	20	20	16	16	12	12
Prosječna brzina [km/h]	24,9	23,17	22,82	25,03	23,53	23,89
Najveća brzina [km/h]	64,3	65,9	64,6	66,2	53	61
Standardna devijacija brzine [km/h]	17,225	15,505	13,936	16,696	16,622	17,41
Prosječna poz. Akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	0,575	0,629	0,6767	0,68	0,728	0,57
Prosječna neg. akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	-0,659	-0,618	-0,582	-0,599	-0,7	-0,647
Prosječna akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	0,042	-0,012	0,012	-0,005	0,029	-0,040
Standardna devijacija pozitivne akc. [m/s <sup>2</sup> ]	0,6984	0,6127	0,6947	0,6205	0,5710	0,5518
Standardna devijacija akceleracije [m/s <sup>2</sup> ]	0,92	0,846	0,875	0,829	0,873	0,9

tablica 28. karakteristične vrijednosti gradskih ravničarskih linija

**Izvangradske ravničarske linije:**

Ciklus ( linija; smjer )	268; smjer Velika Gorica	268; smjer Zagreb	112; smjer Lučko	112; smjer Savski most
Duljina ciklusa [m]	15390	14310	9643	9899
Vrijeme ciklusa [s]	1938	2400	1104	981
Vrijeme stajanja [s]	434	620	279	247
Vrijeme vožnje [s]	1504	1780	825	734
Broj stanica [s]	20	20	13	13
Prosječna brzina [s]	32,44	27,75	32,87	37,69
Najveća brzina [s]	79,2	63,3	68	69,4
Standardna devijacija brzine [km/h]	19,878	18,49	19,622	18,286
Prosječna poz. Akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	0,65	0,616	0,822	0,946
Prosječna neg. akceleracija [m/s <sup>2</sup> ]	-0,629	-0,581	-0,914	-0,876
Prosječna akceleracija	0,000	-0,001	-0,018	0,006
Standardna devijacija pozitivne akc. [m/s <sup>2</sup> ]	0,5950	0,5994	1,8262	1,2197
Standardna devijacija akceleracije [m/s <sup>2</sup> ]	0,858	0,809	1,158	1,48

tablica 29. karakteristične vrijednosti izvangradskih ravničarskih linija

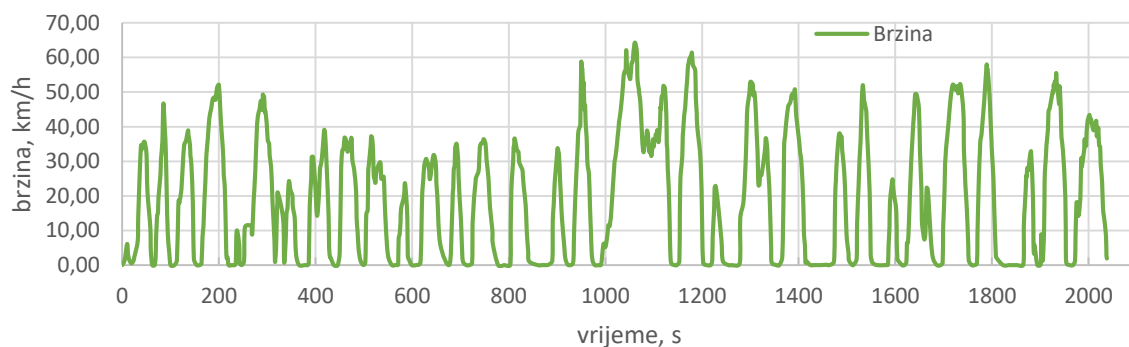
Iz priloženih tablica vidljivo je kako su karakteristične vrste linije uglavnom sličnih vrijednosti, razlikuju se najviše po duljini rute i vremenu trajanja rute. Za primijetiti je razlika u prosječnoj brzini između gradskih ravničarskih i gradskih brdskih te izvangradskih linija. Razlog tomu je što na gradskim brdskim i izvangradskim trasama postoji manji broj semafora, razmak između stanica je veći, a i promet je relativno rjeđi (osim u kritičnim terminima) što samim time omogućuje postizanje viših brzina i manje usporavanja i ubrzavanja.

U usporedbi s Braunschweig ciklusom najviše sličnosti pokazuje linija 109 u smjeru Dugava i to po duljini ciklusa, prosječnoj brzini, prosječnoj pozitivnoj i negativnoj akceleraciji. Broj stanica na ispitanoj liniji nešto je veći od linije Braunschweig ciklusa, no obzirom kako ispitana linija prolazi predjelom grada (Novi Zagreb, Avenija Dubrovnik) u kojem je mnogo semafora, a time i puno stajanja sličnost po toj karakteristici i karakteristici trajanja ciklusa također je vjerodostojna. Ispod je prikazan dijagram brzine za usporedbu s Braunschweig ciklusom.

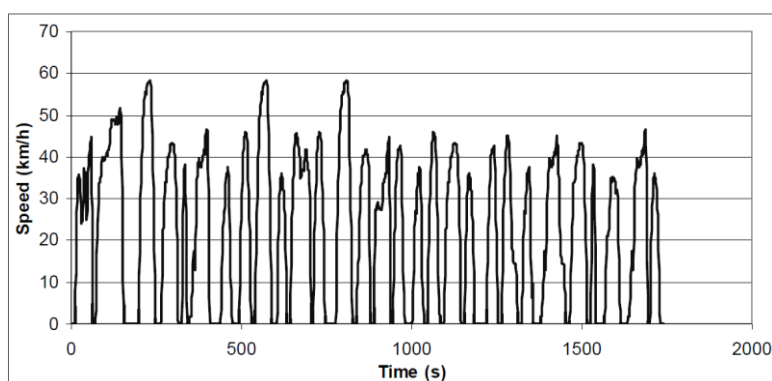


TNO ciklusu vožnje po vrijednostima je najbližija linija 115 Ljubljana – Špansko – Ljubljana u smjeru Ljubljane što je vidljivo iz Tablice 7 i slike 23. na kojoj su prikazane vrijednosti TNO ciklusa.

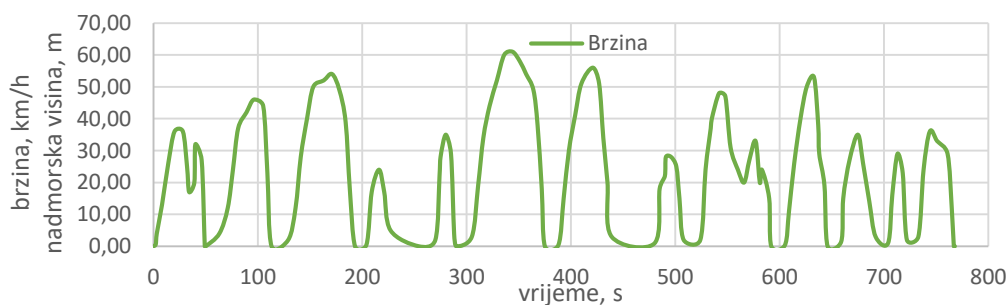
Dijagramima brzine u ovisnosti o vremenu trajanja prikazane su grafičke usporedbe ovih dviju linija sa standardnim Braunschweig i TNO ciklusima.



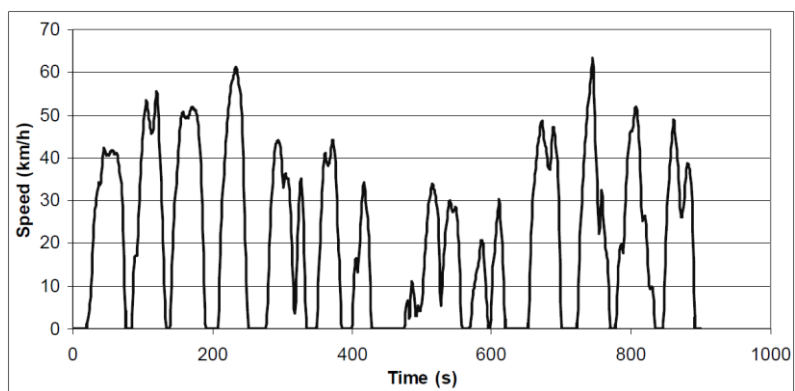
Slika 38. dijagram brzine linije 109, smjer Dugave



Slika 39. dijagram brzine Braunschweig ciklusa [18]



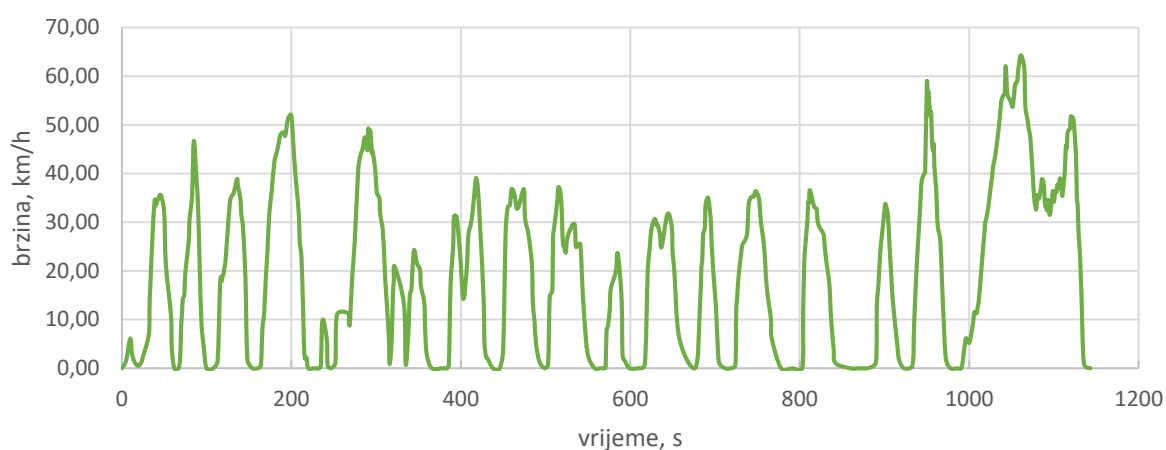
Slika 40. dijagram brzine, linija 115 smjer Ljubljana



Slika 41. dijagram brzine TNO ciklusa [18]

## 5. ZAGREBAČKI VOZNI CIKLUS

Na temelju snimljenih linija vožnje u sklopu ovog rada moguće je osmisлити zagrebački vozni ciklus kao koji bi poslužio u svrhu testiranja autobusa s električnim pogonskim sustavom, a i ispitivanja razine emisije štetnih plinova. Kako se većina linija gradskog prijevoza u oblasti tvrtke ZET može svrstati u kategoriju gradskih ravničarskih linija. Prosječna udaljenost od polazne do krajnje točke gradskih ravničarskih linija iznosi oko 6,5 km, prosječan broj stanica je 12 – 14, a vrijeme trajanja vožnje 15 – 20 minuta. Iz tog razloga za reprezentativan uzorak, kao zagrebački vozni ciklus, uzet je segment linije 109 u smjeru Dugava grafički i tablično prikazan ispod.



slika 41. dijagram brzine zagrebačkog voznog ciklusa

Zagrebački ispitni ciklus		Prosjek snimljenih gradskih ravničarskih linija
Duljina ciklusa [m]	5906	7477
Vrijeme ciklusa [s]	1143	1350
Vrijeme stajanja [s]	211	350
Vrijeme vožnje [s]	932	1000
Broj stanica	12	16
Prosječna brzina [km/h]	24,08	23,89
Najveća brzina [km/h]	64,3	62,5
Standardna devijacija brzine [km/h]	16,478	16,23
Prosječna poz. Akceleracija [ $\text{m/s}^2$ ]	0,605	0,6431
Prosječna neg. akceleracija [ $\text{m/s}^2$ ]	-0,628	-0,6342
Prosječna akceleracija [ $\text{m/s}^2$ ]	0,022	0,0043
Standardna devijacija poz. Akceleracije [ $\text{m/s}^2$ ]	0,6194	0,62485
Standardna devijacija akceleracije [ $\text{m/s}^2$ ]	0,837	0,8738

tablica 30. karakteristične vrijednosti zagrebačkog ispitnog ciklusa

Bitno je napomenuti da je ovaj ciklus rezultat relativno malog broja mjerenja s opremom ograničene točnosti i analize činjenica vezanih uz javni gradski prijevoz u Gradu Zagrebu. Za standardiziranje ciklusa potrebno je mnogo više od nekoliko snimljenih linija uređajem korištenim za ova ispitivanja. Nužno je snimiti barem 20 različitih linija gradskog prijevoza koje se mogu kategorizirati u gradske ravničarske linije, zatim na temelju njih napraviti sintezu, odnosno zamijeniti taj veliki broj realnih uzoraka s jednim sintetičkim koji se može smatrati realističnim i koji se može uzeti kao standardan za zagrebački vozni ciklus u režimu gradske ravničarske trase. Jednako tako vrijedi za gradske brdske linije i za izvangradske ravničarske linije. Sinteza bi se mogla provesti slično kako je to napravljeno u [19] na ispitivanju energetske potrebe flote dostavnih vozila jedne hrvatske kompanije. U sklopu ovog rada je to napravljeno na daleko jednostavniji način.

## 6. ZAKLJUČAK

U svrhu smanjivanja emisije CO<sub>2</sub> i štetnih plinova industrija vozila na globalnoj razini orijentira se prema proizvodnji i usavršavanju 'čistih' pogonskih sustava. Istraživanja novih tehnologija na području baterija, koje predstavljaju najveću prepreku kako masom i kapacitetom tako i cijenom, u velikom su zamahu.

Nakon provedenih analiza, obrade podataka i dobivenih rezultata energetske potreba za snimljene linije zaključuje se kako je samo na nekoliko linija gradskog prijevoza, sa sadašnjom tehnologijom baterija, isplativo ugraditi sustav koji se puni tokom noći. Radi se o gradskim ravničarskim linijama koje su duljine do 6 km i na kojima prometuju autobusi standardne duljine zbog njihove manje mase. Za duže gradske ravničarske linije (i one na kojima prometuju zglobovi autobusi), gradske brdske linije i izvangradske linije rješenje bi postojalo u slučaju izgrađene infrastrukture u obliku brzih punionica (*Opportunity-charging*) na trasama kojima voze ili u slučaju ako je okretište autobusa uz okretište tramvaja, iskoristiti postojeću električnu mrežu. Tako bi se u autobuse ugrađivali setovi baterija manjeg kapaciteta, a opet dovoljnog za vožnju trasom u oba smjera bez opasnosti prijevremenog pražnjenja. Kako bi se to postiglo potrebna su vrlo visoka novčana ulaganja, prenamjena autobusa te kupnja novih s već postojećom tehnologijom.

Pošto je, po nekim predviđanjima, zaliha fosilnih goriva ograničena i ta vrsta goriva vrlo negativno utječe na okoliš, a EURO emisijske razine štetnih plinova svakim su razredom sve strože, može se zaključiti da će se u dogledno vrijeme (10-15 godina) intenzivno raditi na elektrifikaciji voznog parka u sastavu tvrtke ZET, slično tendencijama koje postoje postoje u Europi i svijetu.

**IZVORI**

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Transport\\_in\\_Paris#The\\_Omnibus.2C\\_Autobus](https://en.wikipedia.org/wiki/Transport_in_Paris#The_Omnibus.2C_Autobus)
- [2] [https://www.siemens.com/history/en/news/1071\\_trolleybus.htm](https://www.siemens.com/history/en/news/1071_trolleybus.htm)
- [3] <http://www.skoda.cz/en/products/trolleybuses/>
- [4] <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/lifestyle/mercedes-benz-magazines/classic-magazine/the-first-motorized-bus-dating-back-to-1895-was-a-benz/>
- [5] <http://www.bus.man.eu/hr/hr/gradski-autobusi/man-lions-city-hybrid/pregled/Pregled.html>
- [6] McKinsey and company: Urban buses, alternative powertrains for Europe, FCH JU, 2014.
- [7] Zlatomir Živanović, Zoran Nikolić: The application of electric drive technologies in city buses, New generation of electric vehicles, 2012.
- [8] <http://www.bydeurope.com/vehicles>
- [9] [http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/regenerative\\_braking.html](http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/regenerative_braking.html)
- [10] <https://www.proterra.com/products/catalyst-40ft/>
- [11] <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors/electric-mobility-electric-buses.html>
- [12] <http://zeeus.eu/news/pilsen-starts-to-operate-two-electric-buses-as-part-of-the-zeeus-project>
- [13] <http://www.vdlbuscoach.com/News/News-Library/2015/Wereldprimeur--de-VDL-Citea-SLFA-Electric.aspx>
- [14] Sebastian Naumann, Hedwig Vogelpohl: Models and Methods for the Evaluation and the Optimal Application of Battery Charging and Switching Technologies for Electric Busses, Cactus electromobility, 2015.
- [15] [http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/bus/home/new\\_buses/models/regular\\_service\\_busses/\\_Citaro\\_c2/facts/technica\\_data\\_e6.0003.html](http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/bus/home/new_buses/models/regular_service_busses/_Citaro_c2/facts/technica_data_e6.0003.html)
- [16] Lulić, Ormuž, Šagi: Motorna vozila, predavanja, FSB Zagreb, 2015.
- [17] <http://www.ecologiclabs.com/chassis-dynamometer-testing>
- [18] Barlow, Latham, McCrae, Boulter: A reference book of driving cycles for use in the measurment of road vehicle emmissions, TRL limited, 2009.
- [19] Branimir Škugor: Modeliranje i optimalno punjenje flote električnih dostavnih vozila, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2016.

